

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département d'Electrotechnique

Mémoire de Fin d'études
en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique
Thème :

Détection des décharges électriques sur des surfaces planes polluées en utilisant la technique RP (Recurrent Plot)

Présenté par :

M. AZZAG Mohamed
M. GOZIM Bilal

Proposé et dirigé par :

Pr. A.MEKHALDI
Mr. B.MOULA

Juin 2013

Remerciements

Nous remercions le bon Dieu miséricordieux et clément, qui nous protège et qui nous a guidés dans la bonne voie des sciences et de la connaissance.

Nous tenons à exprimé nos profonds respects et hommages à notre promoteur Mr. A.Mekhaldi pour ses précieux conseils et son dévouement irréprochable.

Un profond merci va à notre co-promoteur Mr. B.Moula qui nous a guidé au long de ce travail, pour sa patience et sa bonne humeur à toute épreuve.

Nous remercions Mr. A.Boubakeur pour le grand honneur qu'il nous exprime par la présidence de notre jury et de nous avoir consacré son précieux temps.

Nous remercions Mr. M.Teguar d'avoir toujours été agréable avec nous et d'avoir bien voulu examiner notre Projet de Fin d'Études.

Je dédie ce modeste travail :

À Celle à qui mon cœur depuis sa naissance n'a pas pu éprouver qu'amour et reconnaissance, à celle qui a donné un sens à mon existence en m'offrant une éducation digne de confiance

À ma chère Mère.

À mon père, pour son amour et son soutien moral depuis mon enfance, Père merci.

À tout les membres de ma famille ; mes sœurs, mes frères.

À mes meilleurs amis :

Mr Zawech, Sir Mojja, Zinoo, Branco, Mustafa, Momoko, Moh LayaLi et Hamada dhib.

À mes amis de Djelfa : Walid, Cokito , Anoir ,Mossab,Antar, Med black, BMo oussama et H.mohamed .

Et à tous qui m'ont connu et aidé de près et de loin dans la réalisation de ce travail.

Bilal

Dédicaces

Ce travail est dédié a la mémoire des mes chères grands parents qui ont donnés un sens a mon existence.

Je dédie ce travail à toute ma famille qui a sue me soutenir et m'encourager tout au long de ma vie.

Que dieux vous garde.

Ce travail est aussi dédié à tous mes amis qui ont toujours été présent pour moi et auprès desquels je me suis toujours sentie chez moi.

Mohamed

ملخص :

تعالج في هذا العمل موضوع تشخيص حالة سطح العوازل الملوثة، باستعمال تقنية مخطط التراجع (RP)، واعتمادا على قاعدة بيانات التجارب التي أجريت على مستوى مخبر التوتر العالي بالمدرسة الوطنية متعددة التقنيات، على نماذج سطحية. في الجزء الأول نستعرض الأعمال التي أجريت مؤخرا على مختلف تطبيقات تقنية (RP). في الجزء الثاني منه، نقوم بتطبيق تقنية (RP) وتطبيقاتها (CRP, JRP) على عناصر عالية التوتر لإشارات تيار التسرب و شحنة كهربيائية. كالتا نقوم بتطبيق تقنية (JRP) على مختلف الإشارات (تيار التسرب، شحنة الكهربيائية، التوتر المطبق). أخيرا نستعمل تقنية (RQA) على إشاراتي تيار التسرب و الشحنة الكهربيائية.

الكلمات الرئيسية: تشخيص، نموذج مسطح، شدة التلوث، تقنية مخطط التراجع، مخطط التراجع المقطع، مخطط التراجع المتصلق، التحليل الكمي للتراجع، تيار التسرب، الشحنة الكهربيائية، التوتر المطبق.

Résumé

Dans le présent travail, le diagnostique de l'état de surface des isolateurs pollués est effectué par la technique RP et ses dérivées, en exploitant des bases de données établies au niveau du laboratoire de haute tension de l'école nationale polytechnique. Dans une première partie, nous présentons une synthèse bibliographique des travaux antérieurs de diverses applications de la RP. Dans la seconde partie, nous avons appliqué la technique RP et ses dérivées, CRP et JRP sur les composantes de haute fréquence des signaux du courant de fuite et de la charge électrique. Dans la troisième partie, nous avons appliqué la JRP aux différentes combinaisons de signaux de courant de fuite, de tension appliquée et de la charge électrique, afin de choisir la combinaison donnant les meilleurs résultats. Enfin, la technique RQA est appliquée au signal du courant de fuite et de celui de la charge électrique.

Mots-clefs : diagnostique de l'état de surface, diagramme récurrent, modèle plan, diagramme récurrent croisé, diagramme récurrent joint, analyse quantitative récurrente, courant de fuite, tension appliquée, charge électrique.

Abstract

In this work, the diagnosis of the surface condition of polluted insulators is carried out by the RP approach and its derivatives, by exploiting databases established in the laboratory of high voltage of l'ENP. In a first part, we present a bibliographical synthesis of former works of various applications of the RP. In the second part, we applied the RP approach and its derived, CRP and JRP to the high frequency components of the LC and the charge signals. In the third part, we applied the JRP to the various combinations of LC, applied voltage and charge signals, in order to choose the combination giving the best results. Lastly, the RQA approach is applied to LC and charge signals.

Key words : diagnosis, polluted insulators, recurrent plot, cross recurrent plot, joint recurrent plot, recurrence quantification analysis, electric charge, leakage current, applied voltage.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Travaux antérieurs sur les applications de la technique RP (Recurrent Plot)	
Introduction	
I.1. Analyse de courant de décharge par la technique RP dans les tests de voie sur des polymères irradiés par les rayons gamma	5
I.2. Analyse du signal du courant de fuite pour la surveillance de l'état de surface de l'isolateur par la technique Recurrent Plot (RP)	11
I.3. Analyse des séquences d'Acide Désoxyribonucléique (ADN) par la technique RP	15
I.4. Utilisation de la technique RP pour l'analyse du signal du courant de fuite sur des isolateurs composites recouvert de glace	17
I.5. Analyse de quantification récurrente comme outils pour l'exploration non linéaire des signaux cardiaques non stationnaires.....	21
I.6. Analyse de quantification récurrente pour comparer l'usinabilité des aciers	24
Conclusion	
Chapitre II : Notion théorique sur la RP et ses applications	
Introduction	
II.1. Théorie du chaos	30
II.1.1 Définition	30
II.1.2. Attracteur de Lorentz.....	31
II.2. Systèmes dynamiques	31
II.2.1. Modèle déterministe, modèle stochastique et modèle chaotique	31
II.2.2. Espace des phases	32
II.2.3 Construction de Ruelle-Takens (méthode des délais)	32
II.3. Le diagramme de récurrence (RP)	33
II.3.1. Définition	33
II.3.2. Les structure dans les diagrammes de récurrence	35
II.3.3. Choix du seuil ε	38

II.3.4. Influence de l'immersion sur les structures de la RP	39
II.4. Cross récurrence plot (CRP)	41
II.5. Joint récurrence plot (JRP)	45
II.6. Comparaison entre la CRP et la JRP	47
II.7. La technique RP appliquée au détail du signal du courant de fuite.....	49

Conclusion

Chapitre III : Application de la RP, CRP et JRP sur les signaux du courant de fuite, de la tension appliquée et de la charge électrique

Introduction

III.1. Les applications de la RP sur le signal de courant de fuite et ses CRP et JRP avec le signal de la charge électrique	56
III.1.1. RP de la composante haute fréquence du signal de courant de fuite	57
III.1.2. CRP des composantes hautes fréquences des signaux du courant de fuite et de la charge électrique	64
III.1.3. JRP des composantes hautes fréquences des signaux du courant de fuite et de la charge électrique	70

III.2. Les applications de la JRP sur les composantes hautes fréquences des signaux de courant de fuite et de la tension appliquée	77
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

III.3. Les applications de la JRP sur les composantes hautes fréquences des signaux de la charge électrique et de la tension appliquée	80
III.3.1. Cas d'une pollution de classe 1	80
III.3.2. Cas d'une pollution de classe 2	81
III.3.3. Cas d'une pollution de classe 3	82

Conclusion

Chapitre IV : Application de l'analyse quantitative de récurrence (RQA) pour l'estimation du degré de sévérité de pollution

Introduction

IV.1. Analyse quantitative du diagramme de récurrence (RQA)	85
IV.1.2. Les mesures de la RQA	85

IV.1.2.1. Basées sur la densité	85
IV.1.2.2. Basées sur les lignes diagonales	86
IV.1.2.3. Basées sur les lignes verticales	88
IV.2. Application de l'analyse quantitative de récurrence (RQA) aux signaux de courant de fuite et de la charge électrique	89
IV.2.1. RQA du signal du courant de fuite	89
IV.2.1.1. Cas d'une pollution de classe 1	89
IV.2.1.2. Cas d'une pollution de classe 2	92
IV.2.1.3. Cas d'une pollution de classe 3	94
IV.2.2. RQA du signal de la charge électrique	97
IV.2.2.1. Cas d'une pollution de classe 1	97
IV.2.2.2. Cas d'une pollution de classe 2	99
IV.2.2.3. Cas d'une pollution de classe 3	101
IV.2.3. Discussion des résultats	104
Conclusion	
Conclusion générale	107
Références bibliographiques	
Annexes	

Introduction

Générale

L'un des problèmes majeurs présents dans les réseaux de haute et très haute tension et les pertes de l'énergie électrique, les pertes qui nous intéressent sont celles qui apparaissent au niveau des isolateurs, cela n'est pas due à leur dimensionnement mais plutôt au degré de pollution de leur surface qui détériore selon la gravité de la pollution la rigidité diélectrique de ces derniers [1], ce qui induit des courants de fuites plus ou moins sévère et dans le pire des cas un contournement, donc un court circuit, ce qui a de grave conséquence sur le comportement du réseau et cause des dégâts irréversible sur les équipements.

Donc, il est primordiale de connaitre à chaque instant le degré de la sévérité de pollution de ces isolateurs, afin de prévenir et d'éviter au maximum les phénomènes de décharges qui entraine le contournement. Ce dernier qui est considéré fatal pour les équipements électrique tel que les transformateurs, disjoncteur et autres, et très néfaste lorsqu'il se manifeste au niveau des lignes aériennes du réseau [2]. Donc on se doit de garder un état propre des isolateurs, soit en les nettoyants ou en les remplaçants.

Pour cela, plusieurs méthodes de diagnostic de l'état de surface existent telle que la transformée de Fourier discrète, transformée en ondelettes discrète (DWT) et continue (CWT) [3]. Toutes ces méthodes portent sur l'analyse des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée, ainsi que la technique RP (récurrent plot) que nous avons utilisé dans ce Projet de Fin d'étude.

Toutefois nous avons essayé d'utiliser quelques applications de la RP comme la JRP et la CRP afin d'arriver à un diagnostic plus précis de la sévérité de pollution sur la surface d'un modèle plan [4].

Notre étude porte sur l'influence de la tension appliquée et de la conductivité de la couche de pollution sur les signaux de courant de fuite, de tension appliquée et de la charge électrique pour les trois classes de pollution.

Dans le premier chapitre, nous avons élaboré une synthèse de quelques articles portant sur quelques applications de la technique de la RP, et cela dans différents domaines telles que la médecine ou encore la mécanique, ainsi que la haute tension. Cependant la RP reste peu

appliquée dans ce dernier par rapport aux autres domaines, car elle est beaucoup plus destinée au domaine de la bio-physiologie où elle connaît son apogée, bien que très récente.

Notre deuxième chapitre porte sur l'origine et la théorie de cette technique et ces dérivées, qui sont issues de la théorie du chaos, donc des systèmes dynamiques ainsi que l'attracteur de Lorentz. Nous exposons aussi de la décomposition du signal par la technique de l'ondelette discrète afin d'arriver à l'obtention de la composé qui donne le résultat le plus en phase avec la théorie et la pratique.

Le troisième chapitre représente la majeure partie de notre travail. Ce dernier consiste en l'application de la RP et ces dérivées, la CRP et la JRP aux premiers détails des signaux du courant de fuite, de la tension et de la charge électrique. Pour cela différents niveaux de tensions, différentes classes de pollution et différentes conductivités ont été considérés afin de parvenir à la meilleur combinaison des signaux et de la méthode qui donnent les résultats les plus précis et les plus utilisables en pratique.

Pour notre quatrième et dernier chapitre, Nous abordons une autre méthode, dérivée de la RP, la RQA. Cette dernière traite l'aspect quantitatif de l'analyse avec la RP, elle-même ne traitant que l'aspect qualitatif, et de la possibilité de l'utilisé comme méthodes complémentaire voire remplaçante de diagnostique du degré de pollution de la surface d'un isolateur plan.

Une conclusion prend place en fin, pour clôturée notre Projet de Fin d'études. Elle reprend tout les résultats et conclusions auxquelles nous sommes arrivés, au long de notre étude.

Chapitre I :

**Travaux antérieurs sur les
applications de la technique
RP (Recurrent Plot)**

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les travaux les plus récents concernant les applications de la technique Recurrent Plot (RP) dans différents domaines. La RP étant destinée au domaine de la bio-physiologie, toutefois, elle donne de très bons résultats dans d'autres domaines en ce qui concerne l'analyse des phénomènes qui évoluent de façon chaotique, comme c'est le cas pour le phénomène des décharges et du contournement sur les surfaces des isolateurs.

I.1. Analyse de courant de décharge par la technique RP dans les tests de voie sur des polymères irradiés par les rayons gamma

Les matériaux polymériques sont des matériaux utilisés de façon répandue dans les milieux de radiation telle que les instruments médicaux, les centrales nucléaires où la sécurité et la fiabilité sont strictement indispensables. B. X. Du et D. S. Dong [5] ont appliqué la technique RP pour analyser le phénomène de décharge sur les surfaces des matériaux polymères irradiés par les rayons gamma basés sur les tests de voie de l'IEC60112.

La panne de voie est un phénomène de rupture diélectrique sur les surfaces des polymères comprenant des voies conductrices carbonisées, quand le dépôt carbonisé construit une isolation, une diminution brutale de résistance appelé : panne de la voie [6,7]. Les rayonnements gamma changent la résistance de voie des matériaux polymériques en modifiant la structure moléculaire de ces dernières [8].

Le courant de décharge détecté durant le test de voie joue un rôle important dans l'analyse des performances diélectriques, plusieurs travaux conduisent à la caractérisation des propriétés de courant de décharge par le calcul de la quantité de décharge ou l'analyse du spectre de puissance. La méthode RP prévoit une visualisation et une description de la caractéristique du courant de décharge dans une même phase est reconstituée par une coordonnée retardée afin d'extraire une information sur le courant de décharge, les résultats sont établis en modifiant le dosage de rayons gamma sur téréphtalate de polyéthylène (PET) et téréphtalate de poly butylène (PBT) [9,10].

La procédure d'évaluation de la résistance de voie du polymère peut se résumer en :

- La détection du comportement chaotique dans le procédé de décharge par le calcul de l'exposant de Lyapunov.
- Prétraitement du courant de décharge.
- Estimation de la dimension d'encastrement et le retard par la méthode C-C.
- La construction de l'espace dimensionnel de m phases de la série du courant de décharge.
- Représenter la RP.

Les essais ont été effectués sur des échantillons de PET et PBT. La taille de ces échantillons est de 3 mm d'épaisseur et de dimensions 20 mm x 20 mm. Les échantillons doivent être essuyé par l'alcool éthylique et les laissés se sécher pendant 24h ou plus dans une enceinte de chaleur puis irradiés à partir de 100Gy à 1MGy avec un pas de 10KGy/h en utilisant ^{60}Co gamma-source.

La figure I.1 représente l'essai reconstitué suivant les spécifications de la norme IEC60112. On applique des gouttelettes par un intervalle de 30 (s) afin de maintenir la conductivité et donc la décharge. Chaque électrode a une épaisseur de 2 mm, une longueur de 45mm et d'une largeur de 5mm, la distance entre deux électrodes est de 4mm, la solution de test est de 0,1% (NH₄Cl) dans l'eau dés-ionisée, la résistivité est 4 mΩ à 23 °C, le temps d'échantillonnage du convertisseur A/D est de 0,1ms.

Les courants de décharge des différentes irradiations sont mesurés sous 325, 375 et 450 V et la panne de voie est définie quand l'échantillon brule ou le courant dépasse 0,5A.

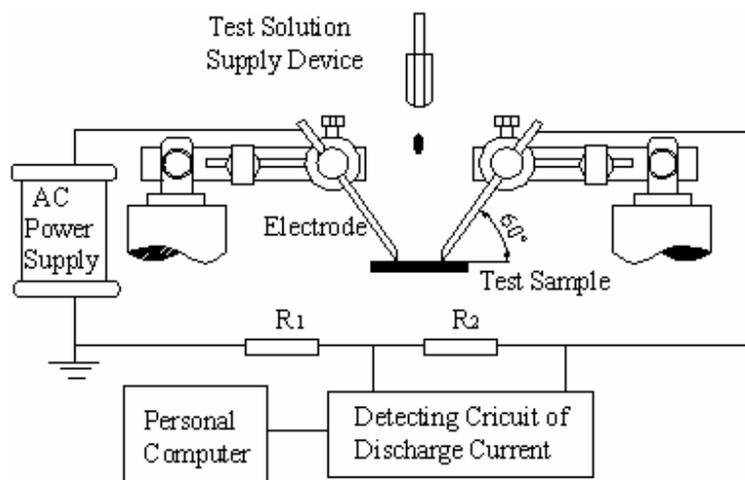


Figure I.1. Dispositif expérimental de l'essai de la résistance de voie.

La détection de la présence de chaos est une condition requise pour appliquer la méthode non linéaire afin d'analyser le courant de décharge, un ou plusieurs exposants de Lyapunov positifs peuvent fournir une condition nécessaire et suffisante pour qu'un système soit chaotique [11] comme le montre la figure I.2:

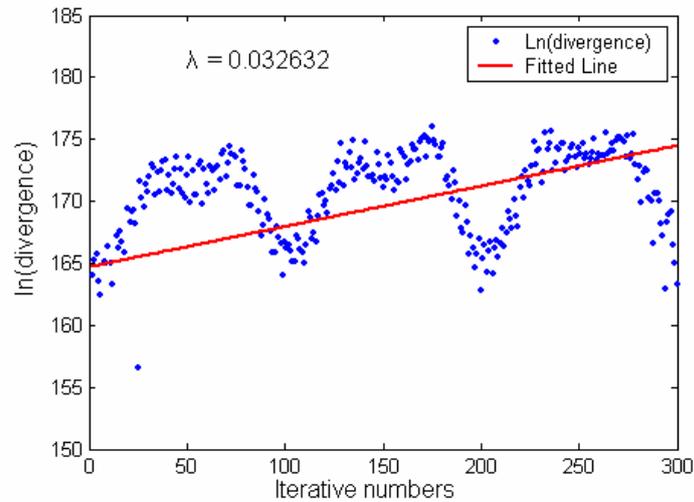
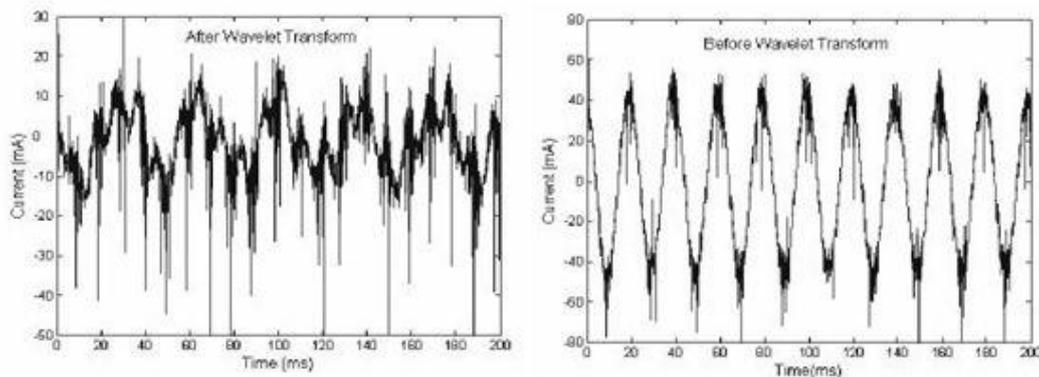


Figure I.2. Estimation de l'exposant de Lyapunov.

La RP est utilisée pour caractériser le degré de périodicité, les caractéristiques d'un système dynamique non linéaire peuvent être illustrées par sa RP [12], la figure I.3 montre un échantillon du courant de décharge avec le PBT non irradié à 325v.

La figure I.3 montre un courant de décharge original donc la décharge se fait au niveau du pic (positif et négatif), et la figure I.3 illustre une séquence de décharge traitée par transformation d'ondelette et sa reconstruction en RP.



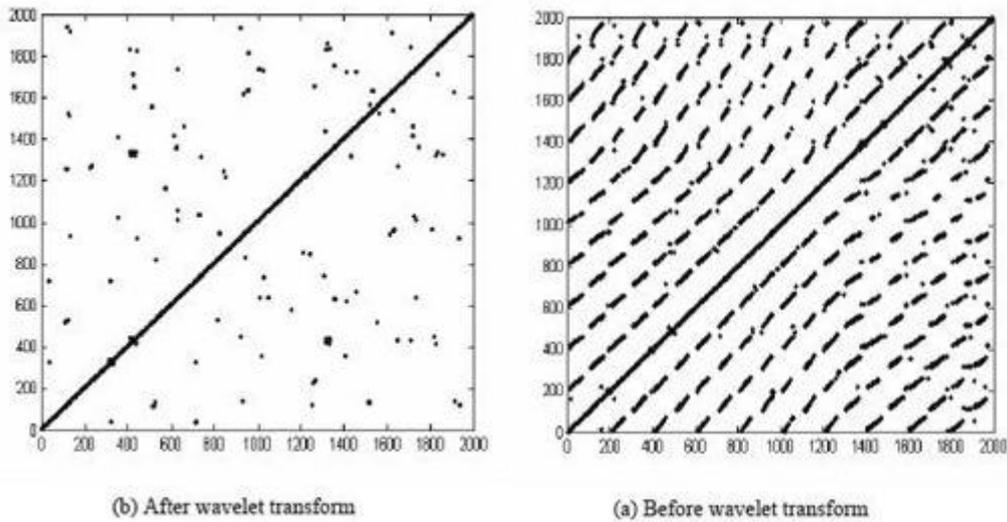


Figure I.3. Echantillon de la RP d'un courant de décharge.

La valeur du CTI est un paramètre de base qui caractérise la complexité géométrique du chaos, il peut présenter une information quantitative, c'est-à-dire combien le système dynamique est chaotique [13].

Pour estimer la résistance de voie du matériau polymère, il existe plusieurs méthodes y compris l'enregistrement du temps de la panne diélectrique, le calcul de la quantité de décharges la mesure de l'angle de pertes diélectriques et teste le CTI, le voltage minimum peut être utilisé pour mesurer la susceptibilité du matériau. La figure I.4 montre bien la relation entre le dosage et l'irradiation.

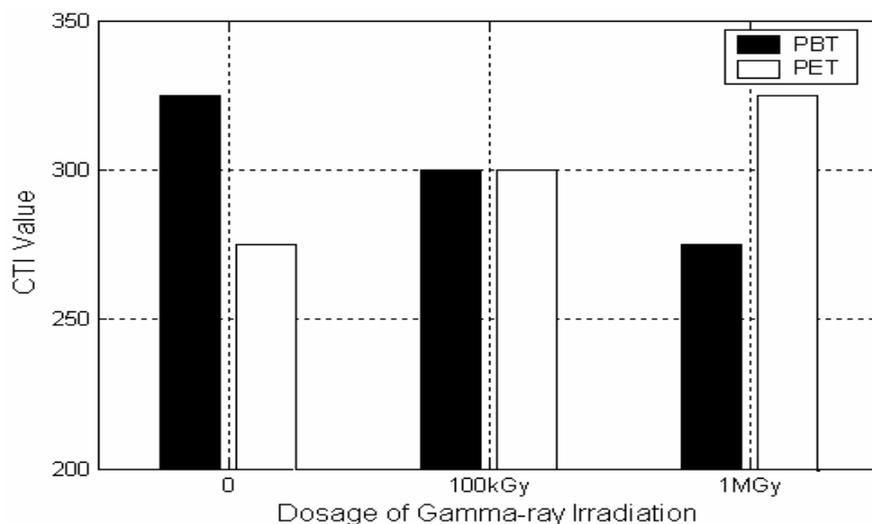
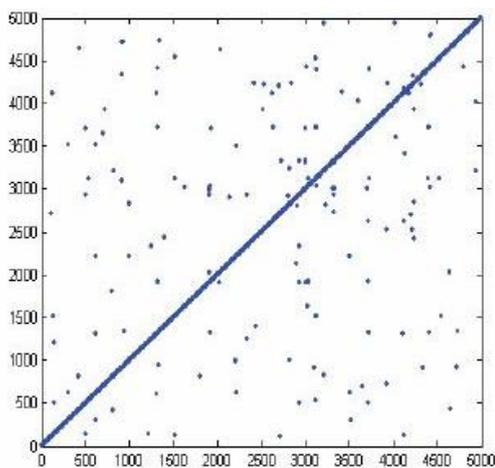
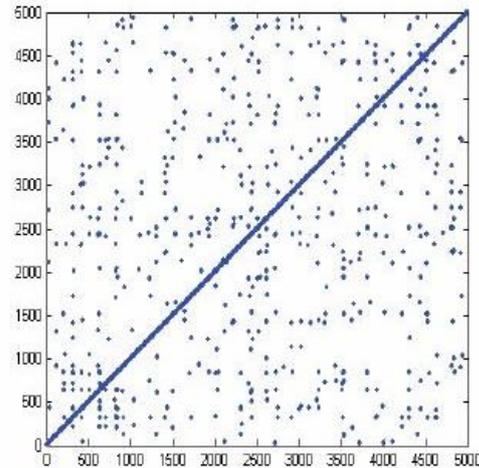


Figure I.4. Relation entre la valeur de CTI et le dosage d'irradiation de gamma.

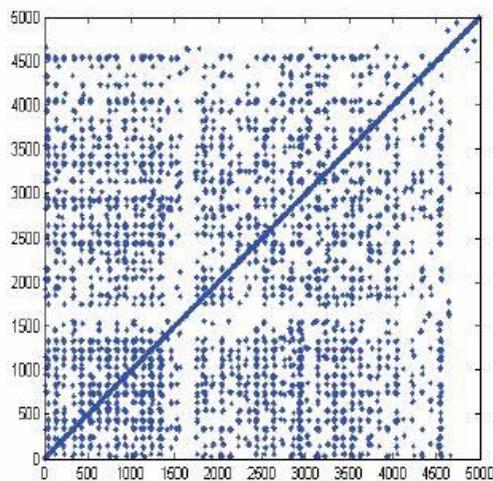
La RP est reconstruite pour présenter la résistance de voie avec différents dosages d'irradiation. La figure I.5 représente une variation de la RP pour des différents cas de décharges pour le PBT avec 100Gy et 350V. La figure I.5.a illustre l'état initial du test où le début du test de voie est un état instable du à l'évolution incomplète de la solution de surface. La figure I.5.b montre l'état intermédiaire de décharge, c'est un état stationnaire et récurrent relativement dense, et la figure I.5.c présente l'état de décharge juste avant la panne où la structure est complètement différente que celles de 5.a et 5.b.



(a) At the initial stage of the tracking test



(b) In the middle stage of tracking the process



(c) Just before tracking failure

Figure I.5. RP pour trois différentes phases de décharge.

La variation de structure pour le PBT 375V et pour le PET 450V avec l'augmentation du dosage d'irradiation dans la figure I.6, la série de temps contient 20000points pour le PBT et

10000 points pour le PET, la décharge se fait après 35s, la figure I.6.a, la densité des points du PBT diminue avec l'augmentation du dosage, la figure I.6.b, la densité des points du PET augmente avec l'augmentation de dosage d'irradiation, les deux tendances opposées de point des densités de points récurrent indique que les rayons gamma possèdent un effet complètement différent sur la résistance de voie pour le PBT et le PET, ce phénomène est bien montré.

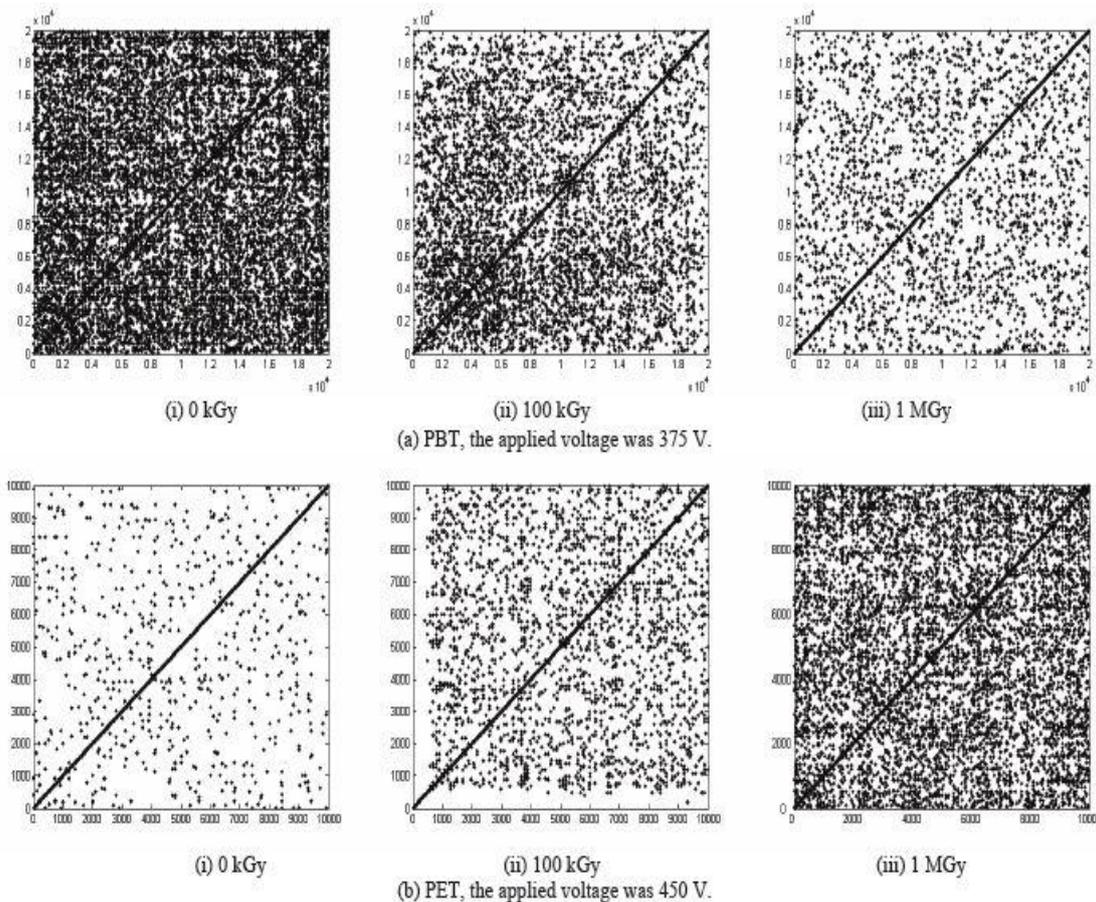


Figure I.6. La relation entre la RP et le dosage d'irradiation de gamma.

Les résultats obtenus montrent bien qu'il est important de visualiser l'état de décharge, la méthode classique de CTI pour évaluer la performance diélectrique est aussi adoptée, on peut donc conclure:

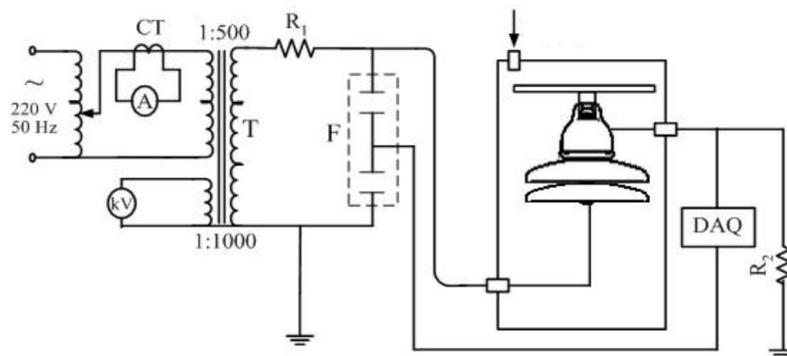
- La RP est bien validé par la CTI et la méthode de dimension fractale et peut donner la résistance de voie de matériau polymère.
- La densité des points de récurrence diminue avec l'augmentation du dosage d'irradiation pour le PBT, ceci peut s'expliquer par la résistance de voie du PBT qui augmente avec la diminution du dosage des rayons gamma.

I.2. Analyse du signal du courant de fuite pour la surveillance de l'état de surface de l'isolateur par la technique Recurrent Plot (RP)

B.X Du et al [4] ont utilisé la technique RP comme outil de surveillance pour étudier les caractéristiques non linéaires du courant de fuite sur les isolateurs. Ils ont introduit une nouvelle méthode d'analyse du courant de fuite pour caractériser l'évolution des décharges partielles avant le phénomène de contournement des isolateurs.

Contrairement aux autres techniques d'analyses comme la DWT, la FFT et l'analyse spectrale utilisées pour le diagnostic des isolateurs sous pollution [14-15], la RP étudie les caractéristiques non-linéaires du signal du courant de fuite (Répartition non-uniforme des points, apparition de bandes blanches de différentes largeur) et donne une meilleure perception visuelle pour la surveillance des isolateurs, en se basant sur les informations extraites à partir de la transformée en ondelette du signal du courant de fuite. L'application de cette technique a porté sur des isolateurs en céramique XWP2-70 pollués artificiellement avec une couche de poudre de diatomite de 1 mg/cm^2 selon les mesures de la NSDD.

Un brouillard est créé dans une chambre où sont introduits ces isolateurs avec une concentration mesurée à l'aide de l'ESDD de 0.4 mg/cm^2 de l'agent conducteur. Une tension alternative de $66\text{ kV}_{\text{eff}}$ et de fréquence 60 Hz est appliquée pour un taux d'humidité de 100% et le courant de fuite est enregistré avec un convertisseur analogique.



T : transformateur – R_1 : résistance de limitation du courant ($100\text{ k}\Omega$) – R_2 : résistance de mesure – DAQ : système d'acquisition d'information

Figure I.7. Dispositif expérimental

Un exemple du courant de fuite juste avant le contournement a été étudié et les composantes sont montrées sur la figure I.8, le comportement capacitif du courant de fuite est dans la plupart du temps concentré aux niveaux de décomposition *ch1* et *ch2*. Les détails de *ch3* jusqu'à *ch6* montrent clairement des décharges sur la surface de l'isolateur. Basé sur la recherche des caractéristiques de fréquence, les composantes de fréquence peuvent être séparées en trois parties : *ch1* jusqu'à *ch3* sont considérés comme les composantes de basse fréquence ; *ch4* jusqu'à *ch5* comme composantes à fréquences moyennes et *ch6* comme composante à hautes fréquences.

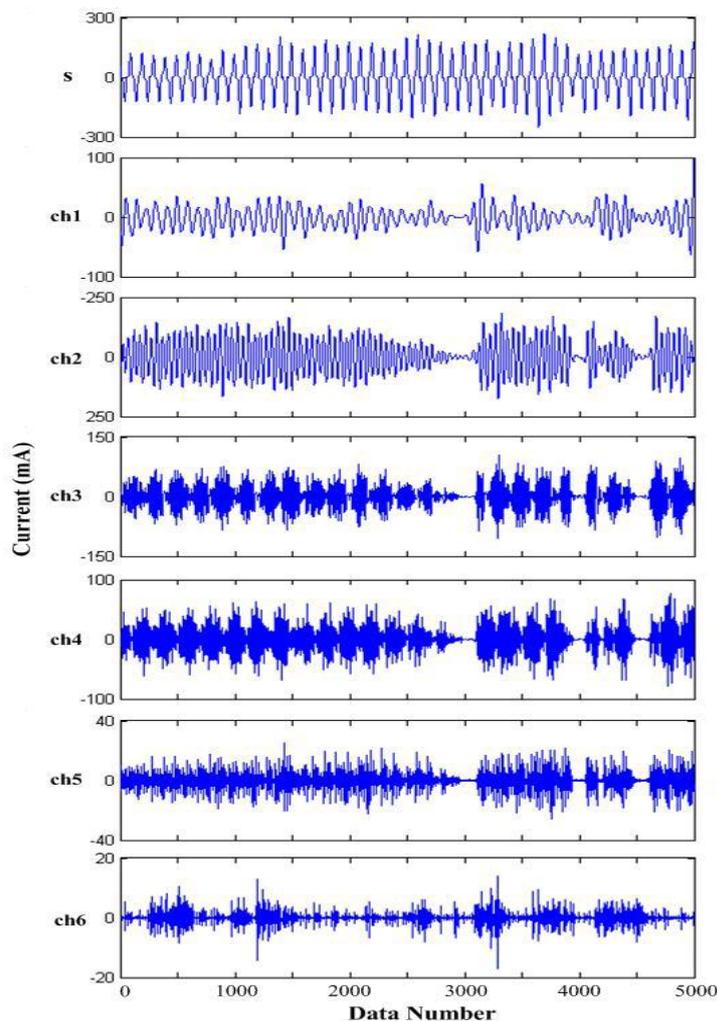


Figure I.8. Fréquences du courant de fuite juste avant le contournement: *s* indique le courant original de fuite ; *ch1* montre le composant à la fréquence de 50 hertz ; *ch2* pour 150 hertz ; *ch3* pour 250 hertz ; *ch4* pour 350-650 hertz ; *ch5* pour 650-1250 hertz ; *ch6* pour 1250 hertz à 2500 hertz.

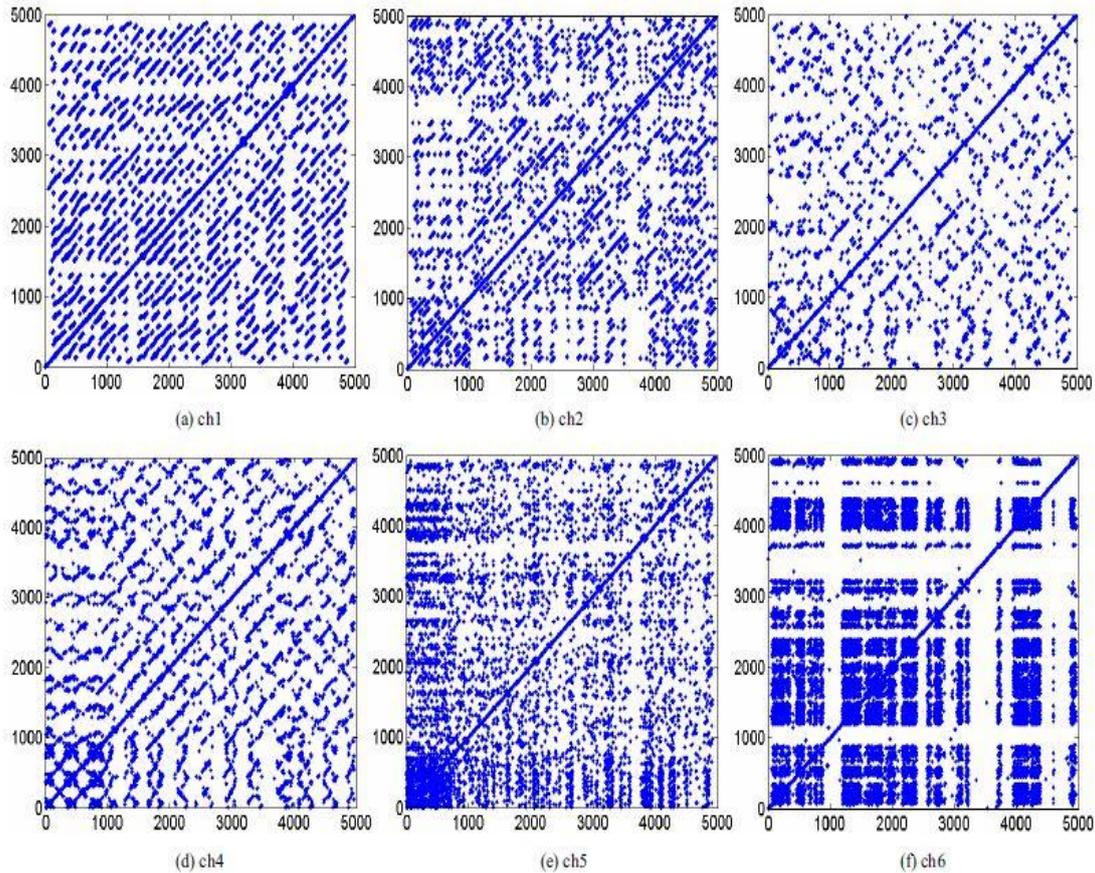


Figure 1.9. RP des composants décomposés du signal de courant de fuite juste avant le contournement: ch1 montre le composant à la fréquence de 50 hertz ; ch2 pour 150 hertz ; ch3 pour 250 hertz ; le ch4 pour 350-650 hertz ; ch5 pour 650-1250 hertz ; ch6 pour 1250 hertz à 2500 hertz.

Les points denses indiquent l'état stationnaire des décharges intenses de la bande sèche. Les segments blancs représentent l'état de transition, qui signifie les différents états de la décharge. L'alternance entre les points denses et les segments blancs démontre les groupes intermittents de décharges de la bande sèche. La portée des points de concentration montre la durée soutenue des décharges. Une telle complexité de la structure de RP indique des activités intenses des décharges et leurs transitions sur la surface de l'isolateur, qui est une indication de décharge de contournement.

Le courant de fuite pendant le processus de contournement est généralement divisé en plusieurs phases : initiale, intermédiaire, juste avant la décharge de contournement et les étapes de décharge de contournement. A l'étape initiale, les formes d'ondes des courants sont toujours sinusoïdales. L'étape intermédiaire est la transition entre l'étape initiale et l'étape

décharge de contournement. Après avoir extrait les composantes de haute fréquence du courant de fuite, les techniques graphiques récurrentes pendant le processus de contournement sont obtenues comme le montre la figure I.10.

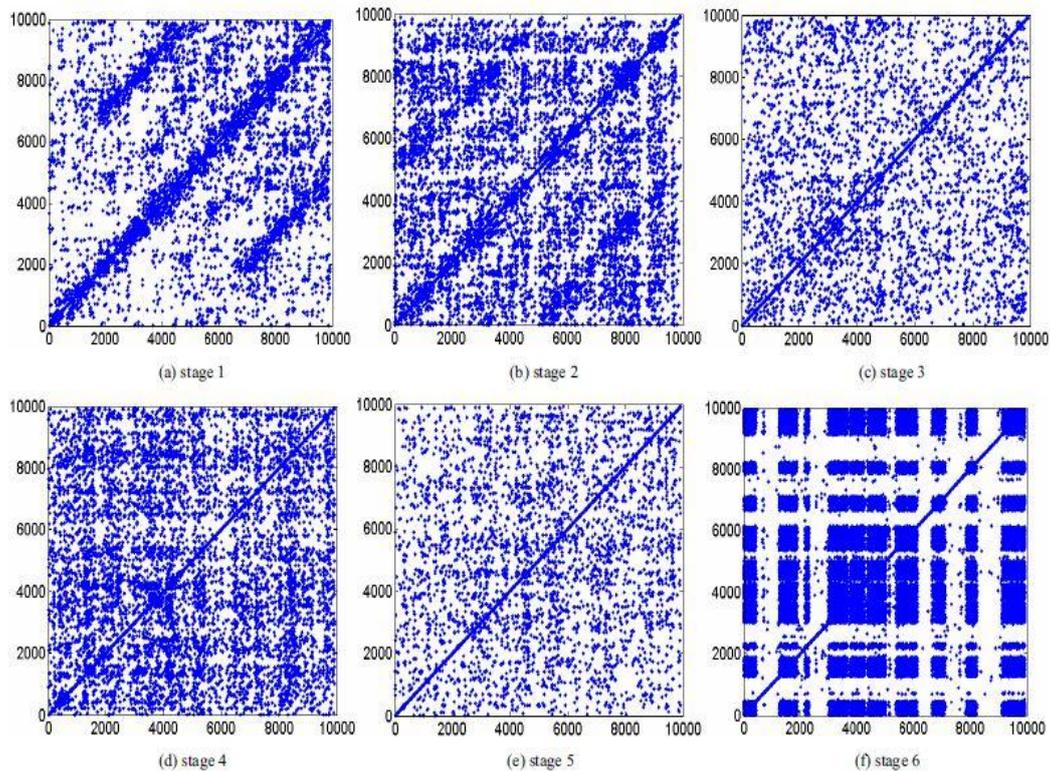


Figure I.10. RP des composantes à haute fréquence pendant le processus décharge de contournement.

Comme observé à l'étape initiale (l'étape 1 et l'étape 2), seulement quelques faibles décharges se sont produites sur la surface de l'isolateur. Les lignes constituées par les points récurrents sont parallèles à la diagonale principale, qui indique l'exécution relativement stationnaire sur la surface de l'isolateur. Les mêmes caractéristiques non linéaires sont dues aux propriétés résistives et capacitives.

Dans la figure I.10.c, les lignes parallèles disparaissent et seulement les points discrets demeurent dans la RP, il montre l'aspect des décharges partielles locales, et la densité des points de la RP dans la figure I.10.d reflète les faibles décharges qui deviennent plus denses sur la surface de l'isolateur. La figure I.10.e indique l'apparition du canal des décharges.

Dans la figure I.10.f, les segments blancs indiquent que l'interruption des décharges intensives et les points denses indiquent la présence d'arcs de décharges intensives. Une telle transition entre les segments indique un proche contournement.

I.3. Analyse des séquences d'Acide Désoxyribonucléique (ADN) par la technique RP

Zuo-Bing Wu [16] a utilisé la technique RP pour analyser la structure de corrélation des cordes de nucléotide et pour déterminer le transfert des cordes de nucléotide à travers une représentation métrique (MR). Cette dernière a été proposée pour faire une commande des subséquences dans un plan et déterminer la suppression de certaines cordes de nucléotide dans les séquences d'ADN [17-18].

L'information d'hérédité et la variation de tous les organismes sont incorporées dans les cordes d'ADN. Pour comprendre l'ordre symbolique unidimensionnel fait de quatre lettres A, C, G, et T, quelques méthodes statistiques et géométriques sont développées en bioinformatique. Nous utilisons la méthode de représentation métrique une à une (MR), pour déterminer les limites d'individu-similitude et des signatures génomiques [19-20].

Dans des ordres d'ADN, la structure de corrélation des cordes de nucléotide permet le transfert des nucléotides. En outre, les éléments transposables d'ADN, qui sont trouvés dans tous les organismes, ont la capacité de se déplacer et de produire des copies dans le génome [21-22].

Une séquence d'ADN est un ordre symbolique unidimensionnel $s_1, s_2, \dots, s_b, \dots, s_N$ ($s_i \in \{A, C, G, T\}$). Dans la méthode MR, nous faisons une correspondance des points (α, β) et les subséquences $\Sigma m = s_1, s_2, \dots, s_m$ ($1 \leq m \leq N$).

Les Subséquences qui possèdent la même fin de corde k-nucléotide, et qui sont marqués par le R_k , correspondent aux points (α, β) dans la zone codée par la corde de k-nucléotide. Pour une corde donnée de k-nucléotide, nous prenons un R_k d'ensemble et une taille correspondante de zone $\epsilon_k = 3^{-k}$.

Pour une subséquence $\Sigma i \in R_k$ nous calculons :

$$\theta(\epsilon_k - |\Sigma i - \Sigma j|) = \theta(\epsilon_k - \sqrt{(\alpha i - \alpha j)^2 + (\beta i - \beta j)^2}) \quad (I.1)$$

Quand $\theta(\epsilon_k - |\Sigma i - \Sigma j|) = 1$, c.à.d, $\Sigma j \in R_k$, nous traçons un point (i, j) dans un plan. Si Σj est pris du début de la séquence symbolique unidimensionnel et déplacé en avant, nous traçons tous les points correspondants dans le plan et obtenons quelques points à la position i . Quand la position i est déplacée de début de la séquence symbolique unidimensionnel,

Σ_i appartient à un autre ensemble de corde de k-nucléotide. Répétant le processus ci-dessus, nous obtenons une RP de la séquence d'ADN. Dans la RP, il existe une symétrie de miroir en ce qui concerne la diagonale ($i = j$).

Un point dans la RP signifie que ces deux subséquences $\Sigma_i, \Sigma_j \in R_k$ ont une distance $|j-i|$ dans la séquence d'ADN.

Pour mesurer la structure de corrélation dans le plan de la RP, nous définissons une intensité de corrélation à une distance de corrélation, nommée l .

Pour montrer les propriétés des RP, nous prenons *HUMHBB* (β -région humain, chromosome 11) avec 73308 bases comme exemple et traçons les RP pour $k = 7, 9, 11, 13$ et 15.

Dans la figure I.11.a, la RP de *HUMHBB* pour $k = 9$ est tracée, les grandes et faibles densités montrent que les cordes de 9-nucléotides à la position de près d'un tiers de la longueur de séquence ont une fréquence élevée.

La plupart de régions ont une même densité de distribution, c.-à-d., le transfert des cordes de 9-nucléotides dans *HUMHBB* est bien distribué.

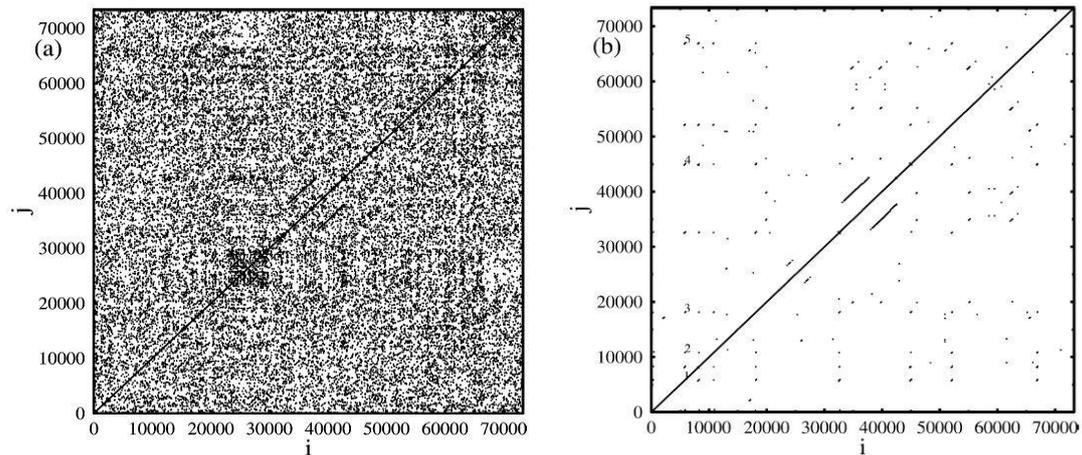


Figure I.11. La RP de *HUMHBB* : (a) pour les cordes de la 9-nucléotide; (b) les cordes de la 15-nucléotide.

Dans la figure I.11.b, les lignes parallèles à la diagonale ne décrivent que de rares longues cordes de nucléotide ($> k$) qui sont transférés dans la séquence d'ADN. En particulier, à la même position i , plusieurs lignes parallèles courtes avec différentes distances de corrélation apparaissent. Elles correspondent à celle d'une longue corde de nucléotide est copiée plusieurs fois.

La figure I.12, montre la RP de *Yeast1* (*Saccharomyces cerevisiae* yeast, chromosome 1) avec 230209 bases pour $k = 11$ et 15.

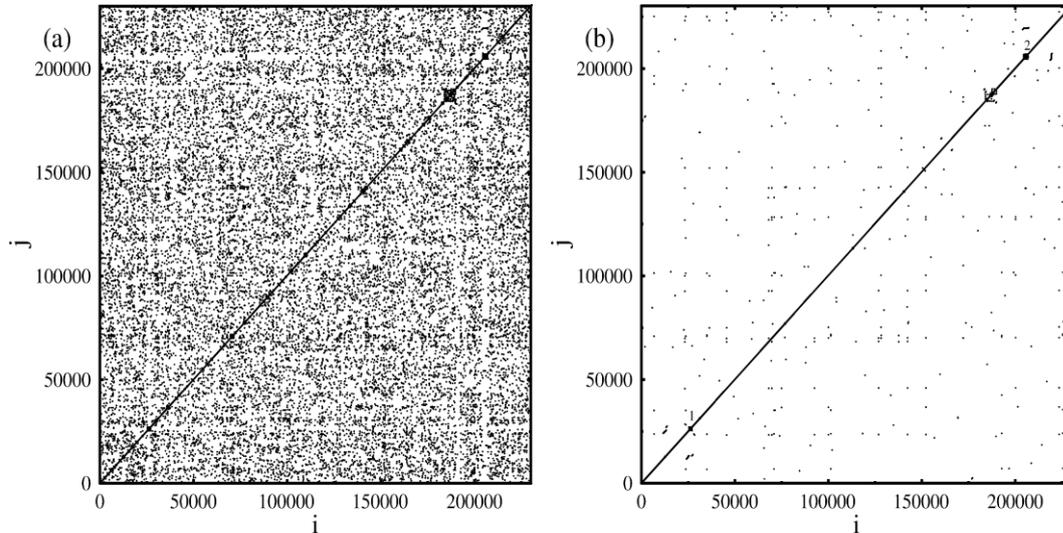


Figure I.12. la RP de *Yeast1* pour (a) cordes de la 11-nucléotide ; (b) cordes de la 15-nucléotide.

La plus part de parties du modèle montrés dans la figure I.12.a sont similaire à ceux dans la figure I.11.a.

Dans la figure I.12.b, il y a deux ensembles carrés de points près de la diagonale, qui sont marqués par 1 et 2. Un ensemble carré de points se compose de beaucoup de lignes parallèles diagonales, qui correspondent à plusieurs cordes de nucléotide voisines répétées à une distance de corrélation de base.

La RP visualise la composition des ordres d'ADN, produit un résultat bidimensionnelle d'un ordre unidimensionnel.

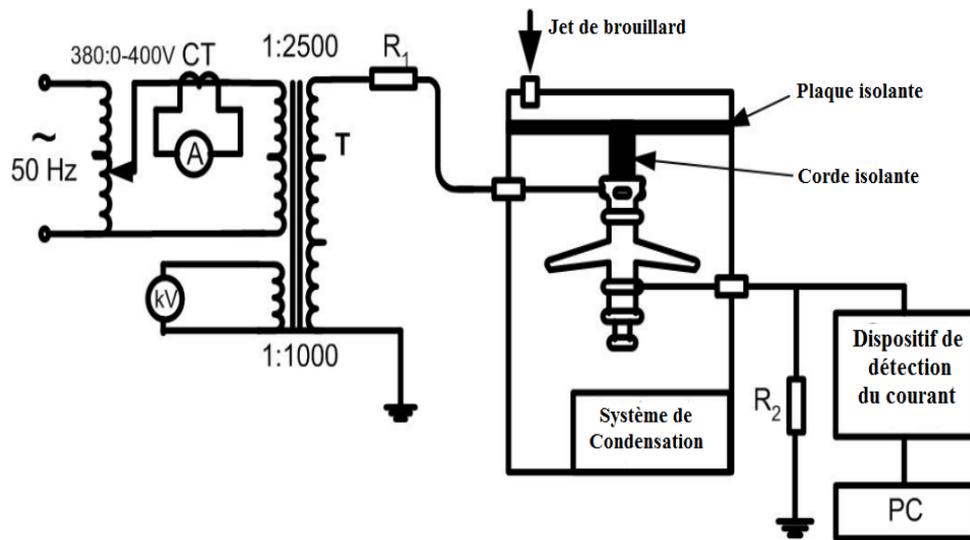
La structure de corrélation est mesurée par l'intensité de corrélation, qui peut montrer le transfert des cordes de nucléotide dans les ordres d'ADN.

I.4. Utilisation de la technique RP pour l'analyse du signal du courant de fuite sur des isolateurs composites recouvert de glace

Dans les régions froides ou à haute altitude, la neige, la glace et le givre constituent les principaux paramètres qui influent sur le comportement des isolateurs. Yong Liu et B. X.

Du [23] ont appliqué la technique RP pour l'analyse du signal de courant de fuite sur des isolateurs composites recouverts de givre et de glace, les travaux de recherche en laboratoire ont été effectués dans une chambre climatique artificielle pour simuler les différentes couches de pollution par la glace et le givre sur la surface de l'isolateur.

Ils ont maintenu la température ambiante à environ $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ en utilisant un contrôleur de température, et le brouillard salin produit par un générateur de sel-brouillard, a été injecté dans la chambre avec une ESDD = 1.0 mS/cm sur la surface de l'isolateur dans une chambre climatique artificielle équipée d'un système de condensation.



T: Transformateur de Haute Tension, R1: Résistance de limitation du courant ($100\ \Omega$),
R2: Résistance de mesure ($1\ \Omega$)

Figure I.13. Dispositif expérimental

Selon l'observation visuelle, le processus de contournement sur un isolateur recouvert de givre et de glace peut être séparé en 6 étapes :

- formation d'une couche conductrice sur la surface de l'isolateur (figure 2a) ;
- il y a de faibles décharges apparaissant sur le bord de l'isolateur (figure 2b) ;
- de fortes décharges apparaissent autour de l'électrode de HT (figure 2c) ;
- phénomènes aléatoires des décharges locales de coupure (figure 2d) ;
- présence d'arc dans l'air (figure 2e) ;
- l'arc local augmente rapidement pour causer le contournement (figure 2f) ;

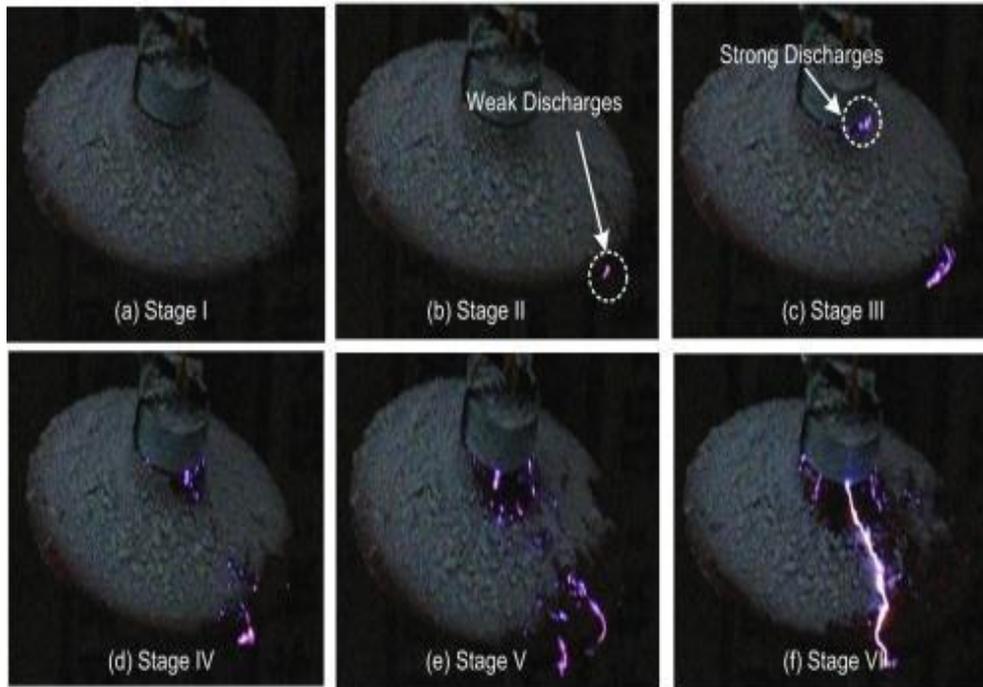
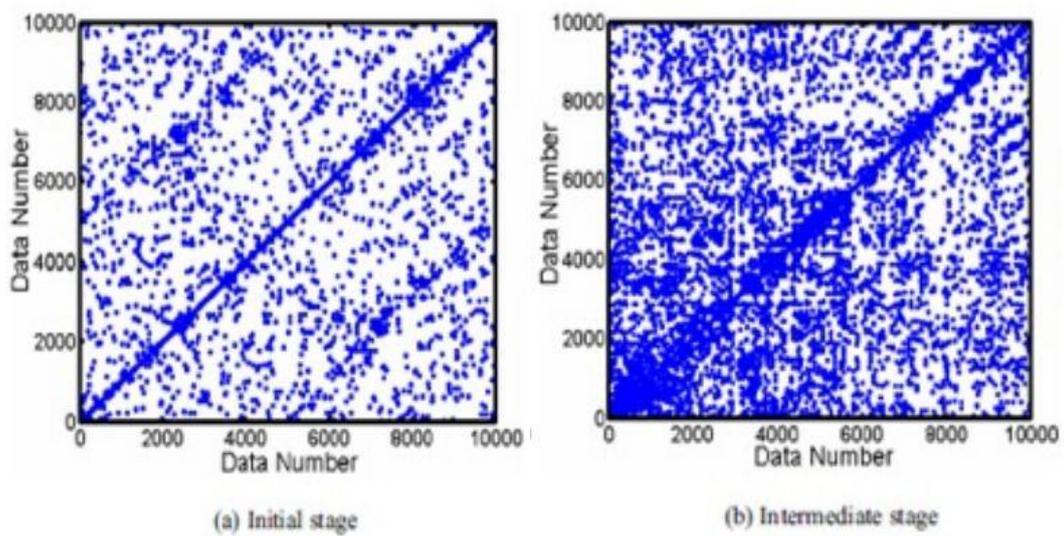


Figure I.14. Processus de contournement sur un isolateur recouvert de givre et de glace.

Après l'extraction des composantes à hautes fréquences du courant de fuite, les structures topologiques du RP pendant le processus de contournement sont obtenues suivant les indications de la figure I.15, ce qui donne les caractéristiques non-linéaires du signal du courant de fuite. L'évaluation visuelle de la structure indique la transition de la performance dynamique sur la surface de l'isolateur.



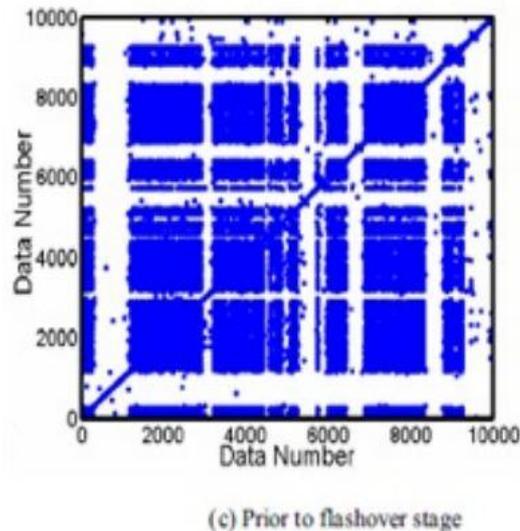


Figure I.15. RP des composantes hautes fréquences du LC au cours du contournement.

Selon l'observation visuelle des morphologies de la glace et des décharges sur la surface de l'isolateur, les chercheurs ont constaté qu'il y a apparemment deux propriétés différentes : une est caractérisée par les points récurrents formant les lignes, qui sont parallèles à la diagonale principale, suivant les indications de la figure I.15.a, l'autre est caractérisée par l'alternance des points récurrents concentrés et des segments blancs de l'espace, suivant les indications de la figure I.15.c. Les points denses indiquent l'état stationnaire de décharges intensives de la bande sèche. Les segments blancs représentent l'état de transition, qui signifie les changements de différents états de décharge. L'alternance entre les points denses et les segments blancs démontre les groupes intermittents de décharges de la bande sèche. La portée des points de concentration montre la durée soutenue des décharges.

La technique RP obtenue montre les caractéristiques non linéaires pendant le processus de contournement d'un isolateur recouvert de givre et de glace. La technique RP a été efficace pour l'identification des comportements dynamiques sur la performance de l'isolateur pendant le processus de contournement. Le mécanisme fondamental de contournement sous le givre et la glace peut être indiqué par la structure topologique et les indicateurs quantitatifs de la RP.

I.5. Analyse de quantification récurrente comme outils pour l'exploration non linéaire des signaux cardiaques non stationnaires

J.P. Zbilut et al [24], ont utilisé l'analyse de quantification récurrente (RQA) pour le diagnostic des changements des signaux cardiaques non stationnaires qui ne sont pas facilement détectables par des méthodes traditionnels.

Etant donné que les signaux biologiques, en plus d'être non linéaires, tendent à être non stationnaires, contentent des bruits ayant une dimension élevé, des méthodes telles que la théorie du chaos ce sont montré insuffisante pour élucider leur complexité, c'est là que la rué vers les nouveaux outils afin de y parvenir a commencé, toutefois, d'après plusieurs expérimentations il s'est avéré que le chaos à bas dimension ne pouvait pas expliquer les phénomènes cardiaques même avec des méthodes non linéaires comme les ondelettes car elle se base sur des théories des systèmes linéaire stationnaires ce qui est vraiment rare dans les systèmes biologiques, mais en incluant les séries chronologiques dans un espace dimensionnel plus élevé et tracé les répétitions dans une matrice selon une règle définissant une tolérance d'erreur, c'est alors que des modèles qui n'étaient pas évidents dans les séries originales ont été bien observé. L'avantage de cette méthode est que son algorithme n'a besoin ni de supposition ni de transformation mathématique, bien que la méthode soit visuelle, son inconvénient majeur reste la nature qualitative, car c'est la nature quantitative qu'est recherché dans cette étude [25].

Donc après avoir récupéré le signal et tracé la RP que rentre en scène la quantification répétitive (RQA) qui a été développées afin de fournir la quantification des importants aspects révélés par la RP et cela en se basant sur des paramètres d'après lesquels il génère 5 variable telle que %REC qui représente le pourcentage du RP remplie par les points et ces cinq variables de répétitions qui mesurent la structure et la complexité déterministes, et peuvent être suivies dans le temps par une version « fenêtrée » de RQA et ou encore être combinée à d'autres techniques statistique pour avoir plus d'informations.

La détermination des paramètres des séries non stationnaires reste le problème majeur malgré que la RQA est faite pour comprendre les séries non stationnaires, toutefois, pour ces systèmes les degrés de liberté changent et les algorithmes qui sont utilisés pour cela

sont basés sur des simulations d'exemples stationnaires ce qui est rare en biologie. Néanmoins, quelques directives peuvent être établies, basées sur les recherches disponibles, et un examen consciencieux de l'importation de la non-stationnarité.

Comme pour la non-stationnarité, plusieurs choix doivent être faits pour avoir les meilleurs résultats et lecture possible (déformation du signal) tel que le choix de l'encastrement pour prendre en charge le caractère bruyant du signal ou encore le choix du retard qui doit être fait de manière soit constante ou dynamique, mais afin de ne rater aucun détail du signal et avoir le plus d'informations possibles et pour finir le choix du rayon est primordiale car son choix définit la récurrence, s'il est très petit on ne capturera alors que le bruit et non le signal, au contraire s'il est trop grand, on aura alors des données qu'on ne peut pas qualifier de récurrentes. Pour cela il existe deux méthodes, la première c'est de calculer le %REC pour des valeurs croissantes du rayon r et faire le tracé logarithmique des résultats afin de déterminer une région de « graduation » comme le démontre la figure I.16.

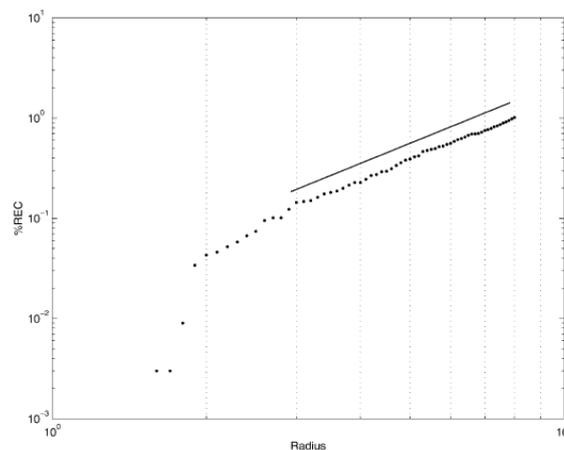


Figure I.16. Tracé de %REC vs r : Un choix approprié du rayon est le commencement de la région de graduation au-dessus du plancher du bruit.

Deux exemples de l'application de RQA, le premier est la singularité des battements du cœur. L'ECG n'est pas continu, cette singularité est importante pour la RQA et qui peut être facilement ratée pour le mauvais choix du rayon r . Soit physiologiquement ou numériquement une pause avant la vague P est visible décrite dans le contexte d'un mécanisme de remise à zéro, cela implique une seule phase entre les deux vagues T et P. Mais la RP a démontré une discontinuité dans cette phase décrite par la figure I.17, Cette irrégularité ne peut être vue par la FFT ou par ondelettes.

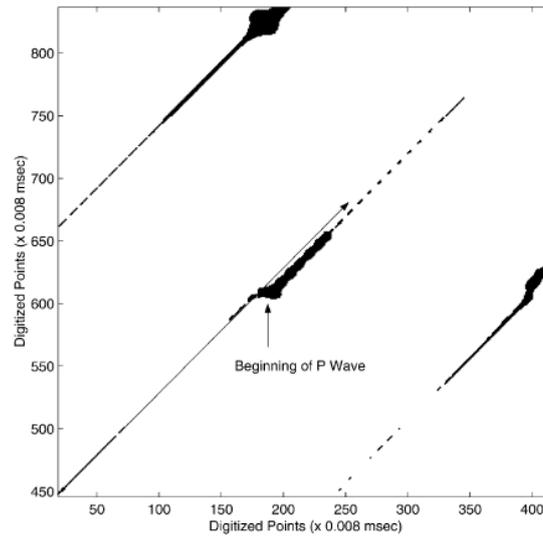


Figure I.17. RP d'une ECG échantillonnée à 500Hz : La flèche pointe vers la discontinuité au début de la vague P.

Le deuxième exemple concerne l'ECG dans le cas d'une épilepsie, car en utilisant la RQA « fenêtré » on a remarqué un changement dans ces paramètres juste avant la crise, ces changements ne peuvent pas être vu par d'autres méthodes telles que la FFT comme le montre les figures I.18 et I.19.

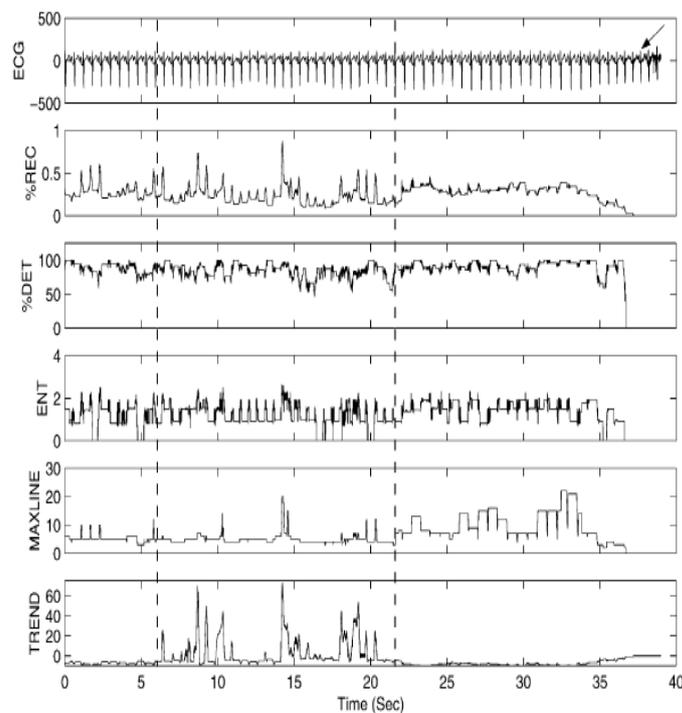


Figure I.18. ECG et variable de la RQA fenêtrée juste avant la crise : Les pointillés représentent le lieu du changement et la flèche le moment de la crise.

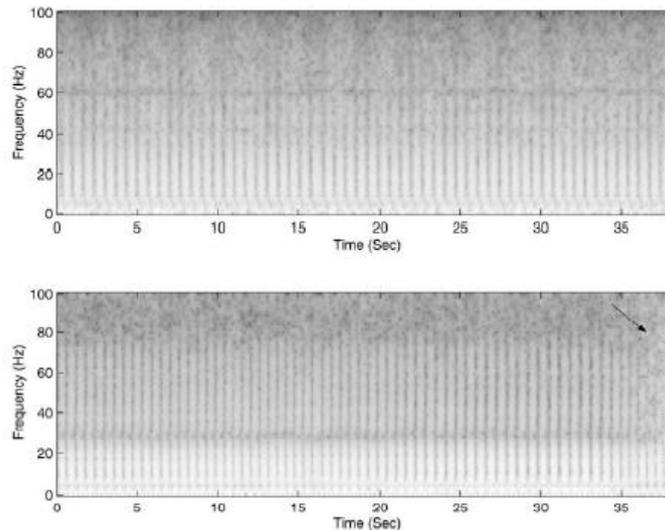


Figure I.19. Spectre temporel de la FFT : pas de différence jusqu'à la crise pointe de la flèche.

Malgré la tentation d'écarter les techniques linéaires dans l'analyse des signaux cardiaques cela serait bien regrettable. Dans plusieurs cas des techniques comme la FFT s'avèrent très utiles comme quand il y a présence de large effet claire visible dans le cas des périodicités approximatives de l'ECG. Toutefois, quand il ya des non-stationnarités et/ou des non-linéarités, les méthodes telles que la RQA devrait être considérée étant donné son avantage majeur, en plus de sa simplicité, elle n'exige aucune supposition mathématique.

I.6. Analyse de quantification récurrente pour comparer l'usinabilité des aciers

K.S. Umashankar et al [26] ont utilisé la méthode RQA afin d'essayer de comparer l'usinabilité des aciers. Le terme usinabilité est souvent appliqué aux matériaux de travail et pour décrire leurs propriétés d'usinage. C'est toujours un dilemme d'évaluer l'usinage du métal avant sa manufacture commerciale, car c'est elle qui affecte l'usure de l'outil, l'état de surface, les besoins en énergie et la tenue de l'outil. Cependant, les expériences suggèrent que dans les processus de finition, l'usure de l'outil et l'état de surface sont les considérations les plus importantes [27].

L'acier et ses variantes forment des alliages les plus utilisés, de ce fait, établir l'usinabilité de ces aciers est essentiel. De nombreuses tentatives ont été faites pour obtenir

une mesure quantitative de l'usinabilité. Un procédé pour déterminer un tel indice serait très utile, en particulier pour les sidérurgistes qui doivent vérifier les propriétés d'usinabilité de leurs matériaux de travail. Cependant, aucune méthode permettant de trouver l'indice d'usinabilité n'a été universellement accepté.

La RP est une technique par laquelle nous pouvons évaluer qualitativement un signal de série temporelle intégrée dans l'espace des phases. Il ya beaucoup de variations dans la RP et il faut se pencher sur l'application en question avant de décider de la variante de RP qui doit être utilisé.

La DP (Distance Plot) est une variante commune, où, au lieu d'un tracé noir et blanc on obtient un tracé coloré par codage des distances entre les points dans l'espace des phases à tomber dans différentes plages de distances qui sont convenablement codés en couleur [28].

Les figures **I.20**, **I.21**, **I.22** et **I.23** démontrent l'obtention DP et RP à partir des données de séries temporelles ou nous avons comme exemple une sinusoïde.

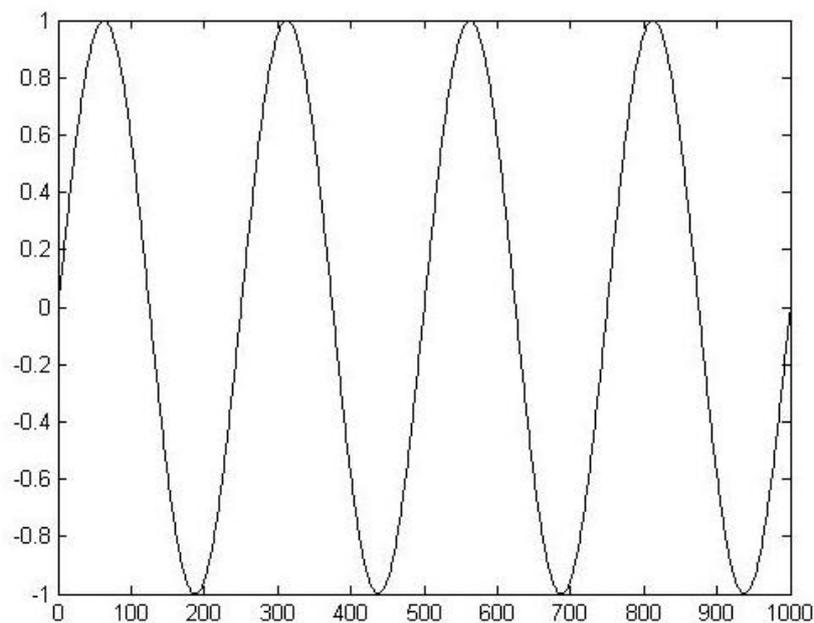


Figure I.20. Les séries temporelles des sinus (fréquence 4 Hz).

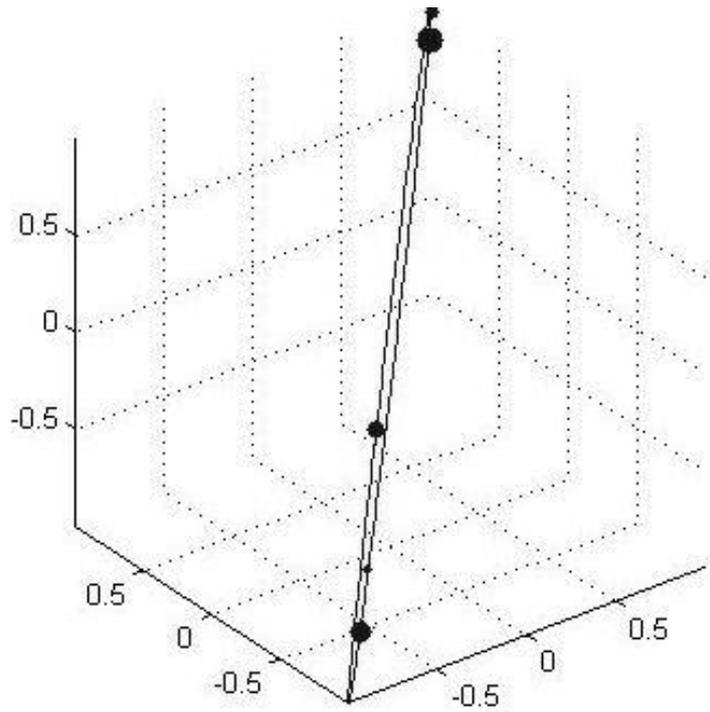


Figure I.21. Tracé l'espace de phase d'une sinusoïde.

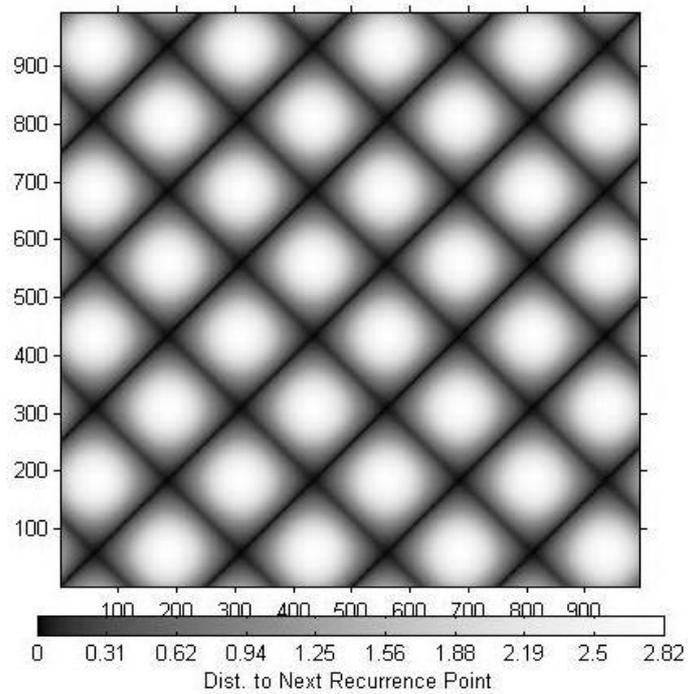


Figure I.22. Distance plot de sinusoïde (dimension d'intégration = 2, temporisation = 6, la norme maximale).

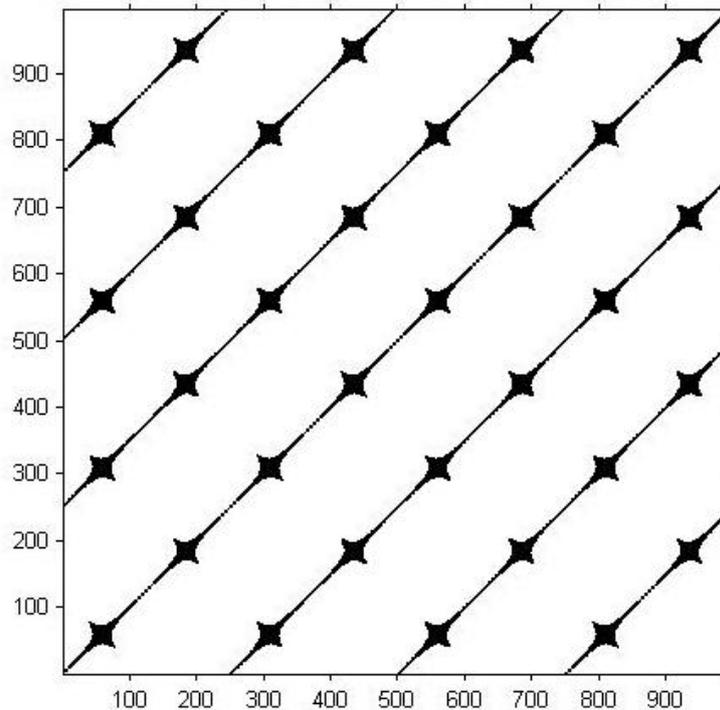


Figure I.23. Réurrence plot de sinusoïde (dimension d'intégration = 2, temporisation = 6, seuil = 0,1, Norme maximale).

Mais Il est toujours difficile de juger l'état d'un système juste en observant les RP correspondants. Certains moyens de quantification de RP rendraient le comportement facile. D'où le recours à la technique d'analyse de quantification de la récurrence (RQA) qui était basée dans un premier temps sur la quantification des structures des lignes diagonales présentées dans RP, pour se baser en suite sur des structures de lignes verticales [28,29].

L'Analyse de quantification de récurrence (RQA) est une nouvelle technique relative à l'étude des systèmes dynamiques non linéaires qu'ils ont utilisés comme un outil pour établir l'usinabilité des matériaux. Pour se faire, on a considéré quatre variétés d'acier, chacune ayant différentes proportions d'éléments d'alliage. Les signaux de force de coupe dans le sens d'alimentation ont été considérés pour les analyser. Pour établir la crédibilité de la technique, l'état de surface des pièces ainsi que la puissance absorbée par le moteur de la broche pendant l'usinage a également été mesuré et comparé.

Pour les mêmes conditions de coupe, une meilleure usinabilité implique un bon déroulement du processus d'usinage et cela se traduit en signaux de force de coupe très réguliers en cours de production, tandis que le faible usinage, résulte en des signaux de force de coupe irréguliers.

Cette nature même des signaux de force se reflète dans les valeurs DET (de la RQA). Pour de bonnes conditions d'usinage, DET atteint des valeurs plus élevées, et dans les mauvaises conditions d'usinage, DET s'effondre à des valeurs inférieures.

En notant que la technique de l'analyse de la quantification de récurrence est très sensible aux changements des conditions d'usinage et peut être complètement utilisée pour établir et comparer l'usinabilité des aciers de types différents, donc la possibilité de pouvoir atteindre une norme qui concernera l'indexage de l'usinabilité.

Conclusion

La synthèse de ces articles nous a permis de bien connaître ce qui est la technique de la RP, son vaste domaine d'application, les mécanismes conduisant au contournement des isolateurs, les applications du traitement du signal en haute tension.

La RP a montré ces preuves dans différents domaines dans lesquels est présent l'électrotechnique et la haute tension en particulier, pour le diagnostic de différents phénomènes.

Ceci nous a inspiré à utiliser cette technique et ses dérivées pour le diagnostic du degré de pollution des isolateurs pollués.

Chapitre II :

**Notion théorique sur la RP
et ses applications**

Introduction

La RP (Recurrent Plot) ou diagramme de récurrence descend de la théorie du chaos en ce qui concerne son aspect qualitatif. Cette méthode étudie la récurrence des états dans un système dynamique. Elle nous donne des résultats exploitables pour ce qui est de l'étude de la sévérité de la pollution sur une surface plane, et cela par l'analyse des signaux électriques tels que le courant de fuite et de la tension appliquée. Nous avons étudié deux applications de cette méthode. La CRP ou diagramme de récurrence croisé et la JRP ou diagramme de récurrence jointe. Ces deux méthodes se basant sur la RP, sont présentées en tant qu'étude comparatives dérivant de la théorie du chaos, donc c'est par cette théorie qu'on commencera notre chapitre.

II.1. Théorie du chaos

II.1.1 Définition

La théorie du chaos étant très large et majoritairement développé en mathématiques donc pas nécessairement destinée à avoir une application pratique. Mais avant d'arriver aux applications, nous nous devons d'expliquer bien que très brièvement en quoi consiste cette théorie. Les origines de cette théorie remontent aux années soixante où les thèses du physicien russe Landau [30] disaient que seuls les systèmes à grand nombre de variables pouvaient générer des comportements erratiques et imprévisibles. C'est là que le météorologue Lorenz père de la théorie s'aperçut puis démontra en 1963 qu'un petit nombre de variables génère un comportement extrêmement complexe, ce qui fut appelé après par l'effet papillon. Celui-ci constitue l'exemple classique de ce genre de phénomène: l'envol d'un papillon dans la jungle amazonienne peut-il provoquer une tornade au Texas [31].

Les mathématiciens, pour décrire ces systèmes de faible dimension, hypersensibles aux conditions initiales, ayant un comportement irrégulier et erratique, repartirent des travaux de Poincaré [32] et de Lyapunov, et en inventèrent la théorie du *Chaos déterministe*, étude des systèmes chaotiques se comportent, en effet, d'une manière qui peut sembler aléatoire. Mais ce comportement est, en fait, décrit par des équations non-linéaires parfaitement déterministes, comme par exemple les équations de Newton régissant l'évolution d'au moins trois corps en interaction.

II.1.2. Attracteur de Lorentz

Ayant découvert l'extrême répercussion des changements infimes des paramètres initiales sur les résultats surtout pour le long terme, Lorentz construisit un modèle graphique basé sur trois paramètres donc trois dimensions qui furent appelé attracteur [33], ainsi le changement bien que très infimes apporte des changements visibles sur les attracteurs, cela même sur lesquels a été appliqué la RP.

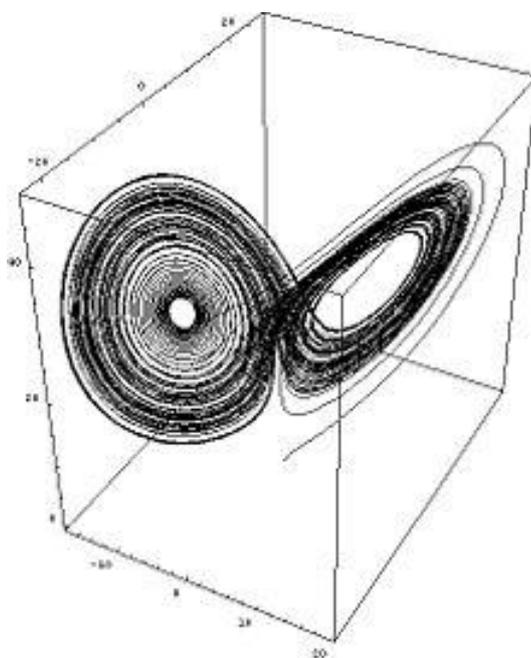


Figure II.1. Attracteur étrange de Lorentz (1963) (papillon).

II.2. Systèmes dynamiques

On dit d'un système physique qu'il est dynamique si celui-ci évolue par rapport à une variable soit temporelle ou autre. Ainsi la trajectoire d'un objet durant son mouvement serait décrits comme un système dynamique c'est le cas aussi du courant de fuite ou encore de la tension appliquée vu que tout les deux évoluent par rapport au temps.

II.2.1. Modèle déterministe, modèle stochastique et modèle chaotique

Les systèmes dynamiques peuvent être divisé en trois modèle majeurs : les systèmes stochastique (ou aléatoire), les systèmes déterministes et les systèmes chaotiques [33].

Les systèmes stochastiques ne sont régis par aucune règle ni équation pouvant prévoir leur évolution, et leur comportement dans l'espace est totalement le fruit du hasard donc ne peut être prédit exactement.

Les systèmes déterministes sont quant à eux régis par des équations mathématiques bien connues, donc leur comportement est prévisible et leur évolution dans le temps est connue.

Les systèmes chaotiques, de leur part, suivent un comportement infiniment complexe. Leur trajectoire suivant leur comportement à une structure infiniment complexe est son mouvement dessus semble hasardeux, toutefois le système ne passe jamais par la même point deux fois et ne quitte jamais sa trajectoire. Les attracteurs caractérisant ces systèmes semblent inclure à la fois des lois déterministes et des lois aléatoires, ce qui rend toute prévision à long terme impossible.

II.2.2. Espace des phases

Afin de suivre l'évolution de l'état d'un système dynamique décrit avec des lois physiques, on définira un point dans un repère à un instant donné. Ce point caractérisera l'état du système dans l'espace à un instant précis. L'espace des phases ainsi obtenue, de dimension N , sera caractérisé par une courbe décrite par l'état du système une fois la variable d'évolution (le temps dans notre cas) changera de valeur.

II.2.3 Construction de Ruelle-Takens (méthode des délais)

En pratique, la mesure de toutes les composantes d'un vecteur x décrit dans un espace de phases à N dimensions étant impossible. Ruelle et Takens [34] prouvèrent, en 1981, la possibilité de la reconstruction de l'attracteur d'une série temporelle. Dès lors, l'espace de phase est reconstruit en un « espace d'immersion » (ou espace d'encastrement) de dimensions m inférieur à N en utilisant les « vecteurs d'immersion » [35] décrit comme suit :

$$X(t_i) = [x(t), x(t_i - 1\tau), x(t_i - 2\tau) \dots x(t_i - (m - 1)\tau)], \quad (\text{II.1})$$

Où m représente la dimension d'immersion, τ est le retard (ou le pas) et $X(t_i)$ est la valeur de la série temporelle à l'instant t_i .

A partir des paramètres d'une seule série temporelle, ce théorème nous permet l'étude du comportement d'un système non linéaire, sur un espace d'immersion reconstruit d'après ces paramètres.

Ces paramètres étant la dimension m et le délai τ , sont estimés par différentes méthodes [36].

La dimension m :

- Faux plus proche voisinage (False Nearest Neighbours) ;
- Méthode de la mauvaise prédiction (Bad Prediction Method) ;
- Dimensions de fractale et de corrélation (Fractal and Correlation Dimensions).

Le délai τ :

- Fonction d'auto-corrélation et de spectre de puissance (Autocorrelation and Power Spectrum Functions);
- Fonction de mutuelle information (Average Mutual Information (AMI) Function);
- Fonction du degré de séparation (Degree of Separation Function);
- Les exposants de Lyapunov.

Ces méthodes étant toutes analytiques, l'existence de méthodes empiriques et aussi présent tel que les «réseaux de neurones» par exemple. D'autres méthodes encore plus élaborées sont entrain de voir le jour et elles donnent de très bons résultats.

II.3. Le diagramme de récurrence (RP)

II.3.1. Définition

Les caractéristiques fondamentales de la récurrence ont été introduit la première fois par Henry Poincaré en 1980 [37]. Et c'est seulement dans ce dernier siècle que la théorie des systèmes dynamiques a connu un progrès remarquable, et cela spécialement dans les dernières décennies grâce au développement d'ordinateurs rapides et efficaces, grâce à quoi a été découvert de nouvelles structures mathématique dans ce domaine. Il a été reconnue que dans un large contexte, les récurrences font partie d'une des trois larges classes des invariants asymptotiques.

L'un des différents types de récurrences et celui qui nous intéresse le plus est celui de Poincaré. Celui-ci est basé sur le théorème de récurrence de Poincaré.

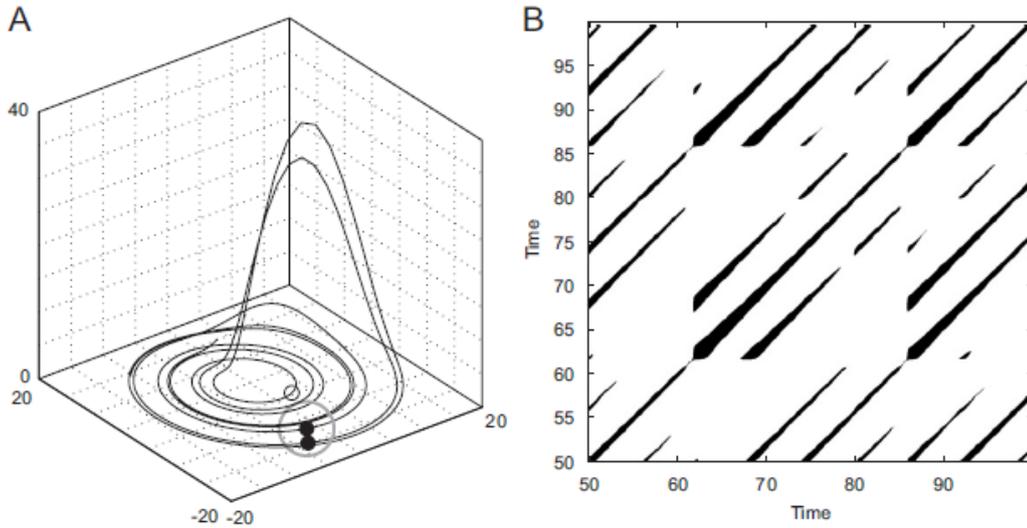


Figure II.2. (A) Segments de la trajectoire d'espace de phase du système Rössler, avec $a = 0.15$, $b = 0.20$, $c = 10$, en utilisant ces trois composantes et (B) la RP correspondante.

Soit T une transformation de mesure-préservation d'un espace de probabilité (X, μ) et $A \subset X$ un ensemble mesurable, alors pour n'importe quel nombre naturel $N \in \mathbb{N}$.

$$\mu(\{x \in A | \{T^n(x)\}_{n \geq N} \subset X \setminus A\}) = 0.$$

Vu que nous étudions la récurrence des systèmes dynamiques, nous devons définir l'outil qui mesure la récurrence d'une trajectoire $\vec{x}_i \in R^d$ dans une phase spatiale: La RP visualise efficacement les récurrences et peut formellement être exprimée par la matrice [38] :

$$R_{i,j}(\varepsilon) = \theta(\varepsilon - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (\text{II.2})$$

Où N est le nombre de points mesurés \vec{x}_i , ε est la distance seuil, $\theta(\cdot)$ est une fonction booléenne (c'est-à-dire $\theta(x) = 0$, si $x < 0$, et $\theta(x) = 1$ sinon), et $\|\cdot\|$ est une norme. Pour ε -états récurrents, c'est-à-dire pour les états qui sont dans un voisinage ε , la notion suivante a été introduite :

$$\vec{x}_i \approx \vec{x}_j \iff R_{i,j} \equiv 1, \quad (\text{II.3})$$

La RP est obtenue par le tracé de la matrice récurrence (figure II.2), et en utilisant différentes couleurs pour ces entrées binaires, par exemple, tracé de point noir au coordonnées (i, j) , si $R_{i,j} \equiv 1$, et des points blanc, si $R_{i,j} \equiv 0$. Les deux axes de la RP sont des axes temporels exposés par convention vers la droite et vers le haut. Car $R_{i,i} \equiv 1 \forall i=1 \dots N$ par définition, la RP a

toujours une ligne principale noir diagonale, ligne identité (LOI). En outre la RP est symétrique par définition par rapport à la diagonale car $R_{i,j} = R_{j,i}$.

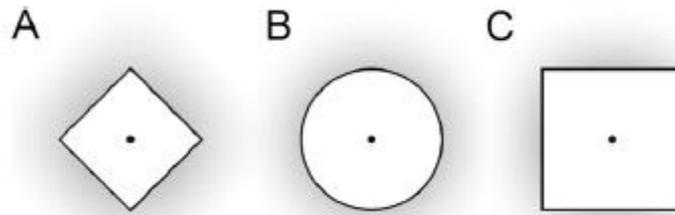


Figure II.3. Trois normes utilisées pour les voisinages pour un même rayon autour du point noir montré pour les phases spatiales bidimensionnelles (A) norme L_1 , (B) norme L_2 et (C) norme L_∞ .

Afin de calculer une RP, une norme appropriée doit être choisie. Les normes les plus utilisées sont L_1 -norme, L_2 -norme (norme Euclidienne) et la L_∞ -norme (norme Maximum). On note que les formes des voisinages sont différentes selon la norme (Figure II.3). Considérons un ε fixe, la norme L_∞ trouve plus de points, la norme L_1 moins de points et la norme L_2 une quantité intermédiaire de points. La norme L_∞ est la plus appliquée à cause de sa vitesse de calcul élevée et permet aussi une étude de certains dispositifs analytiques dans la RP.

II.3.2. Les structure dans les diagrammes de récurrence

Le but initial de la RP était de visualiser la trajectoire dans l'espace de phase, qui est particulièrement avantageux dans le cas des systèmes dimensionnels élevés.

Il existe 4 types de diagramme de récurrence (figure II.4), et cela dépendamment de leurs structures :

- diagramme homogène : la RP homogène est typique pour les systèmes stationnaires dans lesquels les temps de relaxation sont courts en comparaison au temps enjambés par la RP (Figure II.4.a).
- diagramme périodique et quasi-périodique: les systèmes périodiques et quasi-périodiques ont la RP avec des structures récurrentes orientées, périodiques ou quasi-périodiques de diagonale (lignes, structures diagonales de damier) (Figure II.4.b).
- diagramme dévié : est provoquée par des systèmes avec des paramètres lentement variables, c.-à-d. systèmes non stationnaires (Figure II.4.c).

- diagramme interrompu : Les changements brusques de la dynamique causent les secteurs blancs ou les bandes dans le RP (Figure II.4.d) [28, 39].

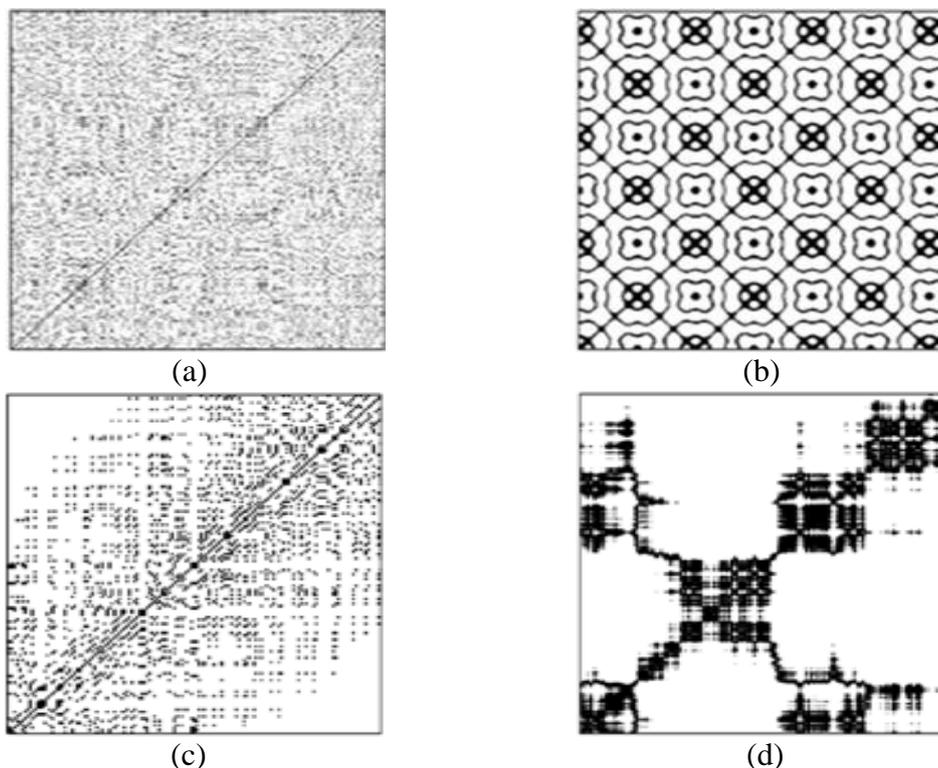


Figure II.4. Caractéristiques topologiques des diagrammes de récurrence
(a) Homogène, (b) périodique, (c) dévié et (d) interrompu.

La technique RP consiste donc en points isolés, points joints dans des segments de lignes et espaces blancs. Les points denses et les segments blancs reflètent dans notre cas la caractéristique non linéaire du signal du courant de fuite. Un « point récurrent » signifie que la distance entre deux vecteurs voisins dans l'espace de phase est inférieure ou égale à la valeur du seuil ε . La diagonale principale existe dans toutes les structures, ce qui correspond au fait que la distance entre le vecteur et la diagonale elle-même est nulle. Le point à la plus haute densité indique que la distance entre les vecteurs reconstruits dans l'espace de phase change légèrement. Il indique que les vecteurs incrustés sont très similaires aux vecteurs voisins dans m -dimensions d'espace de phase [40].

Les points à faible densité représentent un dispersement évident dans le processus. Alors que les espaces blancs indiquent un changement rapide d'amplitude. Nous résumons les significations à propos de la topologie des structures du diagramme de récurrence dans le tableau suivant :

Exemple	Signification
(1) Homogénéité	Le processus est stationnaire.
(2) Éclaircissement des coins haut gauche et bas droit	Données non stationnaires; le processus contient un mouvement ou un décalage.
(3) Disruptions (bandes blanches)	Données non stationnaires ; certains états sont rares; présence de transitions.
(4) Modèle périodique/ quasi-périodique	Processus cyclique ; la période correspond à la distance entre les lignes ; différentes distances entre les lignes diagonales révèlent un processus quasi-périodique.
(5) Points isolés	Forte fluctuation du processus ; si seuls les points isolés sont présents, le processus étudié est faiblement ou non corrélé.
(6) Points denses	La densité des points indique l'intensité du processus étudié. Si les points gagnent en densité, l'activité du processus étudié s'intensifie.
(7) Lignes diagonales (parallèles à la LOI)	L'évolution est similaire à d'autres périodes ; le processus peut être déterministe. Si ces lignes diagonales sont présentes à côté des points isolés, le processus peut être chaotique.
(8) Lignes diagonales (orthogonale à la LOI)	L'évolution est similaire à d'autres périodes mais en temps inverse ; parfois, cela indique une dimension d'immersion m insuffisante.
(9) Lignes verticales et horizontales	Certains états présentent des changements peu nombreux ou lents ; indiquent des états laminaires.
(10) Lignes longues arquées	L'évolution est similaire à d'autres périodes mais à une vitesse différente ; la dynamique du système peut être variable.

Tableau II.1. Exemple typique de diagramme de récurrence et leurs significations.

II.3.3. Choix du seuil ε

Le seuil ε est un paramètre crucial de la RP. Par conséquent, une attention particulière est exigée pour ce qui est de son choix. Si le ε choisi est trop petit, il peut n'y avoir presque aucun point de récurrence ce qui rendra notre étude de la structure de récurrence du système futile car aucun paramètre fondamental n'apparaîtra. D'autre part, si le ε choisi est trop grand, presque chaque point sera voisin à chaque autre point, ce qui mènera à beaucoup d'objets façonnés et une RP totalement erronée. Ainsi, un ε trop grand inclut également des points dans le voisinage qui sont en réalité les points consécutifs simples sur la trajectoire. Cet effet s'appelle mouvement tangentiel et cause des structures diagonales plus épaisses et plus longues dans la RP pendant qu'elles ne le sont pas réellement. Par conséquent, nous devons trouver un compromis en ce qui concerne la valeur du seuil ε .

D'ailleurs, l'influence du bruit peut nécessiter le choix d'un plus grand seuil, parce qu'un bruit tordrait n'importe quelle structure existante dans la RP. Avec un seuil plus élevé, cette structure peut donc être préservée. Plusieurs principes ont été préconisés dans la littérature pour le choix du seuil ε , par exemple, il a été suggéré de prendre la valeur de quelque pour cent du diamètre maximum de l'espace de phase comme seuil [41]. En outre, il ne devrait pas dépasser 10% du diamètre moyen ou maximum de l'espace de phase [42].

Une autre possibilité est de choisir le seuil ε selon la densité de point de récurrence du RP en cherchant une région de graduation dans la densité de point de récurrence. Cependant, ceci peut ne pas convenir aux données non stationnaires. Pour ce cas, on lui a proposé de choisir ε tels que la densité de point de répétition est approximativement de 1% [43].

Un autre critère pour le choix du seuil ε tient compte qu'une mesure d'un processus est une composition du vrai signal et un certain bruit d'observation avec l'écart type σ [44]. La plupart des chercheurs la choisissent comme étant égale à 0.25σ , σ représentant la déviation standard du signal étudié.

II.3.4. Influence de l'immersion sur les structures de la RP

Dans le cas où seulement une série temporelle scalaire aurait été mesurée, la phase spatiale devra être reconstruite, par exemple, par la technique du délai d'immersion. Cependant, cette immersion peut causer une quantité considérable de fausse corrélation dans le système étudié, qui se reflètent dans la RP (figure II.5). Cet effet peut même ajouter des structures diagonalement orientés dans une RP d'une série de temps de valeurs non-corrélatives si l'immersion est haute, bien que les structures diagonales doivent être extrêmement rares pour de telles données non-corrélatives.

Afin de comprendre cela, on prend en considération le bruit gaussien non-corrélatif ε_i avec une standard déviation σ et on calcule analytiquement les corrélations qui sont induites par une immersion non-appropriée. Car le procédé considéré est non-corrélatif, les corrélations détectées après doivent être due à la méthode d'immersion.

Utilisant un délai d'immersion temporelle avec une dimension d'immersion m et un délai τ , un vecteur dans la phase spatiale reconstruite est donné par :

$$\vec{x}_i = \sum_{k=0}^{m-1} \varepsilon_{i+k\tau} \vec{e}_k, \quad (\text{II.4})$$

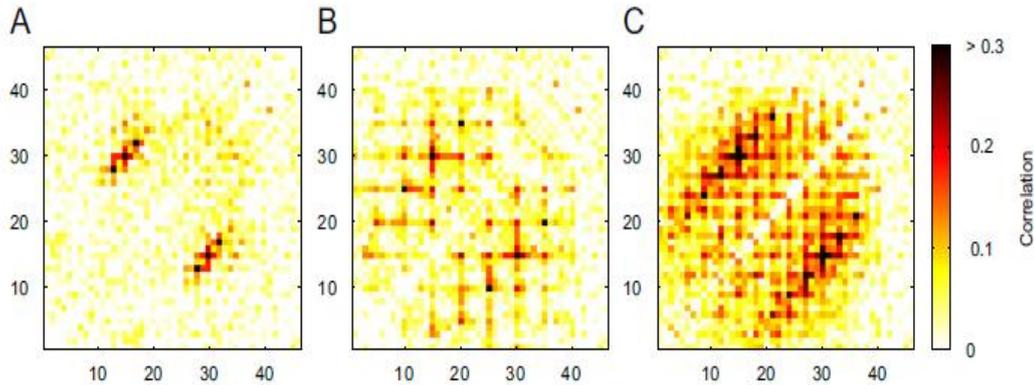


Figure II.5. Corrélation entre un point récurrent en (15,30) (marque par des cercles gris) et d'autres points récurrents dans une RP pour un bruit Gaussien non-corrélatifs (estimé d'après 2000), Les paramètres d'immersion sont (A) $m = 1, \tau = 1, \varepsilon = 0.38$, (B) $m = 3, \tau = 5, \varepsilon = 1.22$ et (C) $m = 5, \tau = 2, \varepsilon = 1.62$, ce qui préserve une densité de point récurrent (0.2) approximativement constante.

La distance entre chaque pair de ces vecteurs est $D_{i,j} = \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|$. Ce déplaçant de h étapes en avant dans le temps (c'est-à-dire, le long d'une ligne diagonale de la RP) la distance respective est :

$$D_{i+h,j+h} = \|\vec{x}_{i+h} - \vec{x}_{j+h}\|, \quad (\text{II.5})$$

Pour la convenance, la fonction d'auto-covariance de $D_{i,j}^2$ sera calculée à l'instar de calculer la fonction d'auto-covariance de $D_{i,j}$. Utilisant la norme L_2 , la fonction d'auto-covariance est :

$$\text{cov}_{D^2}(h, j - i) = \langle (\sum_{k=0}^{m-1} (\varepsilon_{i+k\tau} - \varepsilon_{j+k\tau})^2 - E) (\sum_{k=0}^{m-1} (\varepsilon_{i+h+k\tau} - \varepsilon_{j+h+k\tau})^2 - E) \rangle, \quad (\text{II.6})$$

Où

$$E = \langle \sum_{k=0}^{m-1} (\varepsilon_{i+k\tau} - \varepsilon_{j+k\tau})^2 \rangle = 2\sigma^2 m (1 - \delta_{0, j-i}), \quad (\text{II.7})$$

La valeur d'espérance et $\delta_{i,j}$ est delta de Kronecker ($\delta_{i,j} = 1$ si $i = j$, et $\delta_{i,j} = 0$ si $i \neq j$). Mettant $p = j - i$ et en assumant $p > 0$ et $h > 0$ pour éviter les cas insignifiants, on trouve [45] :

$$\text{cov}_{D^2}(h, p) = \sum_{k=0}^{m-1} (m - k) (8\delta_{k\tau, h} + 2\delta_{k\tau, p+h} + \delta_{k\tau, p-h}), \quad (\text{II.8})$$

Cette équation montre qu'il y aura des pics dans la fonction d'auto-covariance si h , $p + h$ ou $p - h$ est égale à l'un des premiers $m - 1$ multiples de τ . Ces pics ne sont pas présents lorsque l'immersion ($m = 1$). De telles fausses corrélations induites par l'immersion conduisent à des structures modifiées de petite-échelle dans la RP : une augmentation des dimensions de l'immersion nettoie la RP des points singuliers récurrent (représentatifs des états non-corrélatifs) et souligne les structures diagonales (représentatifs des états corrélatifs). Cela, bien sûr, influence n'importe quelle quantification de la RP, qui est basée sur les lignes diagonales. Ainsi, on doit être prudent pour ce qui est de l'interprétation et la quantification des structures dans la RP des systèmes mesurés. Si la dimension d'immersion est, par exemple, non convenablement haute, des fausses longues lignes diagonales apparaissent dans la RP. Pour éviter ce problème, les paramètres de l'immersion doivent être choisis prudemment, ou en alternative les mesures quantitatives qui sont indépendantes des dimensions de l'immersion doivent être utilisées [46].

Les fausses corrélations de la RP due à l'immersion peuvent être appréhendées du fait qu'une RP calculée avec n'importe quel dimension d'immersion peut être dérivée d'une RP calculée sans immersion ($m = 1$). Considérant, par exemple, $m = 2$ avec un certain τ et une norme maximum. Un point récurrent en (i, j) se produit si :

$$\vec{x}_i \approx \vec{x}_j \iff \max(|x_i - x_j|, |x_{i+\tau} - x_{j+\tau}|) < \varepsilon, \quad (\text{II.9})$$

C'est la même chose que $x_i \approx x_j$ et $x_{i+\tau} \approx x_{j+\tau}$ correspondent à deux points récurrent en (i, j) et $(i + \tau, j + \tau)$ dans une RP sans immersion. Ainsi, un point récurrent pour une trajectoire reconstruite avec une dimension d'immersion m est :

$$R_{i,j}^{(m)} = R_{i,j}^{(1)}, R_{i+\tau,j+\tau}^{(1)}, \dots, R_{i+(m-1)\tau,j+(m-1)\tau}^{(m)} \quad (\text{II.10})$$

Ou $R^{(1)}$ est la RP sans immersion (ou RP parent) et $R^{(m)}$ est la RP pour la dimension d'immersion m [47]. L'entrée en (i, j) dans la matrice récurrence $R^{(m)}$ consiste en des informations dans les temps $(i + \tau, j + \tau), \dots, (i + (m - 1)\tau, j + (m - 1)\tau)$.

Si le seuil ε est assez large, les faux points récurrent suivant la ligne $(i + k, j + k)$ pour $k = 0, \dots, (m - 1)\tau$ peuvent apparaitre. C'est clair que, par exemple, dans le cas de signal stochastique qui est immergé dans un espace haut-dimensionnel, de telles lignes diagonales dans une RP peuvent simuler un déterminisme non-existant.

II.4. Cross récurrence plot (CRP)

C'est une extension à deux variables de la RP qui a été introduite afin d'analyser la dépendance entre deux systèmes différents en comparant leur état [48,49]. Elle peut aussi être considérée comme une généralisation de la fonction linéaire de corrélation croisée. On suppose avoir deux systèmes dynamiques chacun représenté par des trajectoires X_i et Y_i dans une phase spatiale d -dimensionnel (figure II.6).

Analogiquement à la RP, la matrice cross récurrence (figure II.7) (récurrence croisée) est définie par :

$$CR_{i,j}^{\vec{x},\vec{y}}(\varepsilon) = \theta(\varepsilon - \|\vec{x}_i - \vec{y}_j\|), \quad i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M, \quad (\text{II.11})$$

Où les longueurs des trajectoires de \vec{x} et \vec{y} ne doivent pas forcément être identiques, et par conséquent la matrice CR n'est pas nécessairement carrée. Ceci dit les deux systèmes sont représentés sur la même phase spatiale, car la CRP recherche pour ces temps où un état pour le premier système récur à un autre dans le deuxième système.

Pour l'utilisation des données expérimentales il est souvent nécessaire de reconstruire les trajectoires dans la phase spatiale. Si les paramètres d'immersions sont estimés pour les deux séries de temps mais ne sont pas égaux le plus grand doit être choisi. Cependant, les données en

considération doivent être pour le même procédé et doivent actuellement représenter la même chose observable. Par conséquent, l'espace de phase reconstruit doit être le même. L'exception est le modèle d'ordre récurrence plot croisée, ou ne l'ont compare pas les valeurs des états mais l'ordre local de classement des deux systèmes [50]. Alors les systèmes peuvent être représentés pour différent observables (ou séries de temps de très différentes amplitudes).

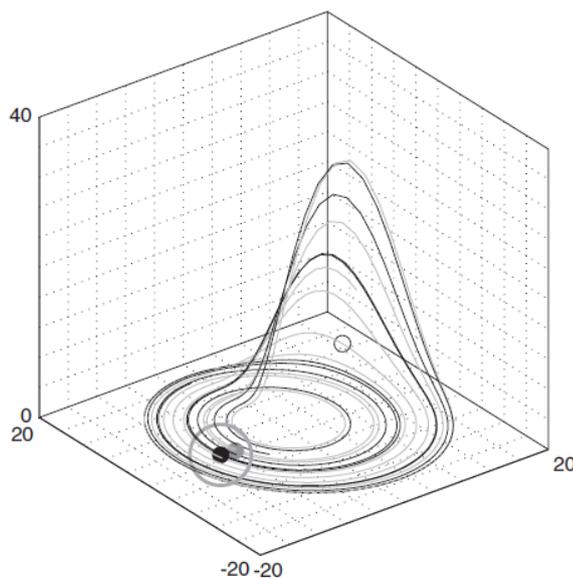


Figure II.6. Phase spatiale des trajectoires de deux systèmes Rössler couplé.

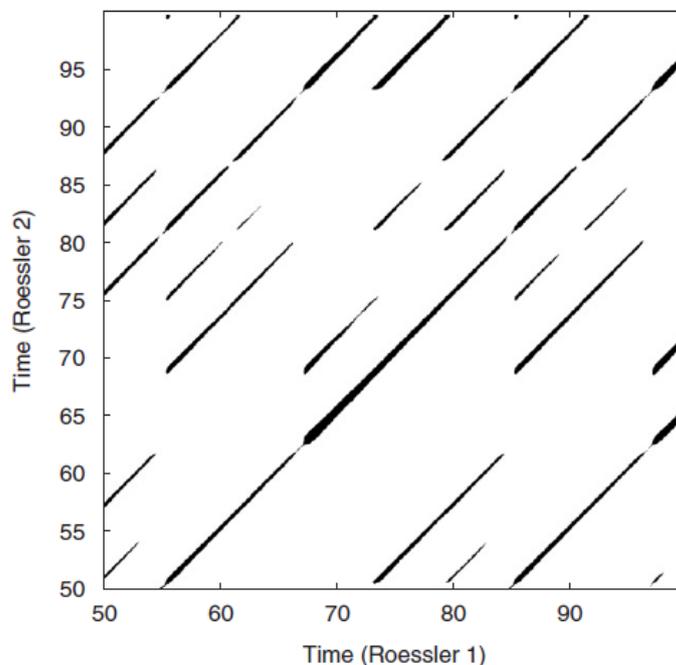


Figure II.7. CRP correspondants aux trajectoires des deux systèmes Rössler couplé.

Cette extension à deux variables de la RP a été aussi introduite pour la quantification récurrente croisées CRQA [48,51]. Les composantes de \vec{x}_i et \vec{y}_i sont souvent normalisées avant le calcul de la matrice récurrente croisée. D'autres possibilités sont l'utilisation d'une quantité fixée de voisinages (éventail, FAN) pour chaque \vec{x}_i ou l'utilisation du modèle d'ordre [52]. De cette manière, les composantes \vec{x}_i et \vec{y}_i n'ont plus besoin d'être normalisées. Le dernier choix du voisinage est plus avantageux pour les trajectoires à changement lent.

Depuis que les valeurs de la diagonale principale $CR_{i,i}|_{i=1}^N$ ne sont pas nécessairement les mêmes, il n'y a habituellement plus de diagonale principale noire (figure II.7). Mis à part, tout ce qui concerne les structures de la RP qui tiennent aussi pour la CRP. Les lignes diagonales sont ici aussi d'un intérêt majeur. Il représente les segments pour les deux trajectoires, qui sont parallèles pour un certain temps. La fréquence et la longueur de ces lignes sont évidemment liées à une certaine similarité entre les dynamiques des deux systèmes, qui ne peuvent pas être détecté par une fonction de corrélation croisée commune [49].

Un important avantage de la CRP est la révélation de différence locale de l'évolution dynamique des segments à trajectoires proches, représenté par des lignes arquées. Une dilatation ou compression temporelle d'une des trajectoires cause une distorsion des lignes diagonales. En assumant deux trajectoires identiques, La CRP coïncide avec la RP d'une trajectoire et contient la diagonale principale noire ou ligne identité (LOI). Si les valeurs de la deuxième trajectoire sont légèrement modifiées, la LOI devient légèrement abrupte et sera appelée ligne de synchronisation (LOS). Cela dit, si on ne modifie pas les amplitudes mais à l'instar on dilate ou comprime légèrement la deuxième trajectoire, la LOS sera toujours continue mais ne sera plus une ligne droite de pente un (angle de 45°). Cette ligne peut devenir arquée (figure II.8).

Comme déjà vu la pente locale des lignes dans une RP comme dans une CRP correspond à la transformation des axes temporels des deux trajectoires considérées [53]. Un décalage de temps entre les trajectoires cause une dislocation de la LOS. Par conséquent, la LOS peut se trouver assez loin de la diagonale principale de la CRP. Comme on va le voir dans l'exemple suivant, la LOS permet de trouver une fonction de ré-graduation non-paramétrique entre différentes séries de temps.

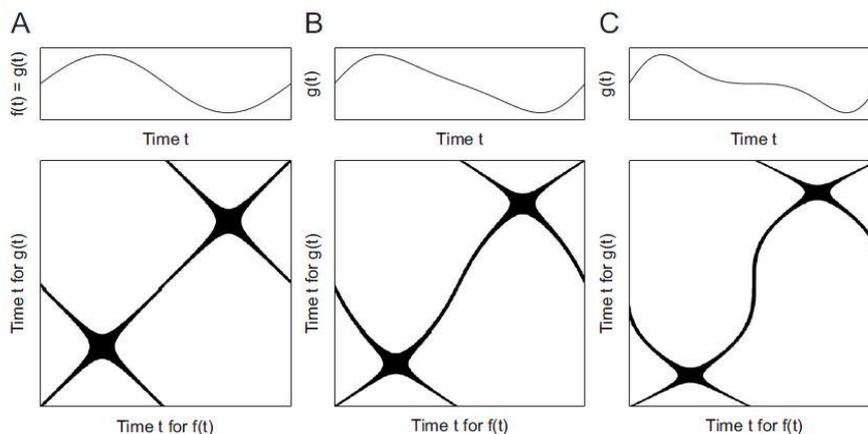


Figure II.8. CRP de trois fonctions sinusoïdales $f(t) = \sin(\varphi t)$ et $g(t) = \sin(\varphi t + a \sin(\psi t))$ avec φ et ψ des fréquences fixe et différentes valeurs de a 0, 0.5 et 1.

Exemple : alignement des échelles de temps de deux fonctions harmonique avec des fréquences variables. On considère deux fonctions sinusoïdales $f(t) = \sin(\varphi t)$ et $g(t') = \sin(\psi t') = \sin(\psi t^2)$, où l'échelle de temps de la seconde sinusoïde diffère de la première d'une transformation quadratique ($t' = t^2$) et a une fréquence $\psi = 0.01\varphi$. Un tel changement non-linéaire des échelles temporelles peut être présent dans la nature par exemple dans les profondeurs croissantes d'un lac ou les sédiments subissent des quantités croissantes de pression, résultant dans une compression. On peut assumer que les deux séries données viennent du même procédé et on été sujet à différentes compressions de déposition (soit une croissance de la compression exponentielle ou carrée).

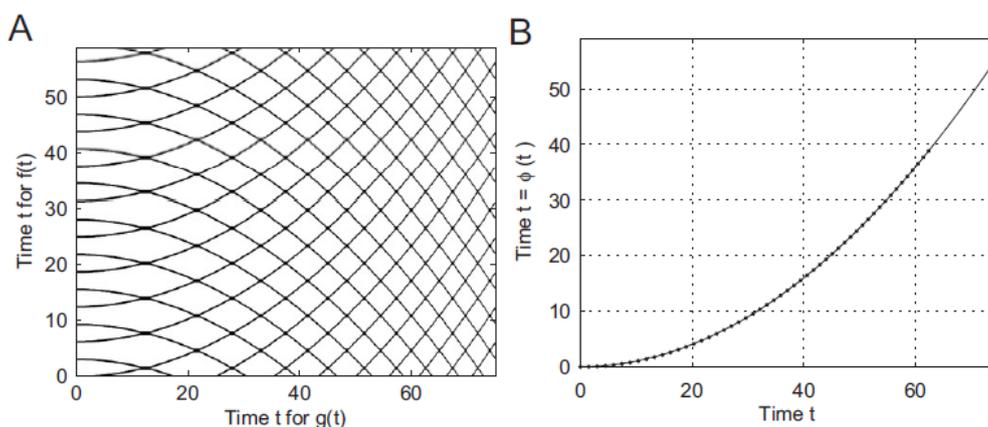


Figure II.9. (A) CRP de deux fonctions sinusoïdales $f(t) = \sin(\varphi t)$ et $g(t) = \sin(\psi t^2)$, (B) fonction de transfert temps déterminé de la CRP.

Par conséquent, leur CRP contient une LOS arquée (figure II.9.A). Pour que la CRP ait une densité récurrente constante de 10% (FAN) nous n'avons pas utilisé d'immersion mais un seuil ε variant. Afin de trouver la fonction de transfert-temps non-paramétrique $t = \phi(t')$, la LOS doit être résolue de la CRP. La fonction de ré-graduation résultante à la forme carrée attendue $t = \phi(t') = 0.01t'^2$ (courbe à tiret gris dans figure II.9.B). Substituer l'échelle temporelle t' dans la deuxième série de données $g(t')$ par la fonction de ré-graduation $t = \phi(t')$, on aura un ensemble de données alignés $f(t)$ et $g(t)$ avec la fonction de ré-graduation non-paramétrique $t = \phi(t')$ (fig II.10). Les séries de temps alignées sont approximativement les mêmes.

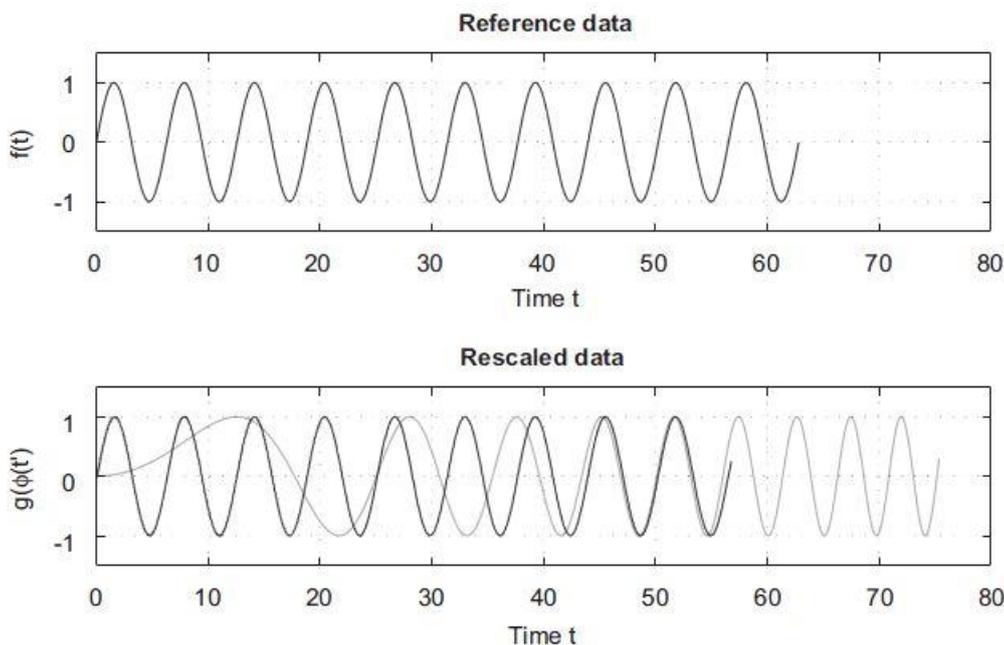


Figure II.10. Séries des données de référence et séries ré-graduées avant (gris) et après (noir) ré-graduation par une fonction de transfert- temps présenté dans la figure II.9.

II.5. Joint récurrence plot (JRP)

Comme on la précédemment vue l'extension à deux variables de la RP sur la CRP permet l'étude des relations entre deux différent systèmes par l'examen de l'occurrence des états semblables. Cependant, la CRP ne peut pas être utilisée pour l'analyse de deux séries de temps physiquement différentes, parce que la différence entre deux vecteurs avec des unités physiques différentes ou encore des dimensions d'espace de phase différentes n'a pas de sens.

Une autre possibilité pour comparer différents systèmes consiste à considéré les répétitions de leurs trajectoires dans leur phase spatiale et voir les instants ou ces répétitions sont simultanées c'est-à-dire une RP commune occurrente. Par cette approche, la phase spatiale individuelle des

deux systèmes reste préservée. Formellement, cela correspond à une extension de la phase spatiale à $R^{d_x+d_y}$, ou d_x et d_y sont les dimensions des phases spatiales des systèmes, qui sont généralement différents (c'est-à-dire ca correspond au produit direct des phases spatiale individuelles).

Vu que deux différents seuils pour les deux systèmes $\varepsilon^{\vec{x}}$ et $\varepsilon^{\vec{y}}$ se présentent alors les critères de choix du seuil peuvent être appliqués séparément suivant les mesures naturelles des deux systèmes. Par conséquent, l'introduction de la matrice de récurrence jointe pour les deux systèmes \vec{x} et \vec{y} devient intuitive :

$$JR_{i,j}^{\vec{x},\vec{y}}(\varepsilon^{\vec{x}}, \varepsilon^{\vec{y}}) = \theta(\varepsilon^{\vec{x}} - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|)\theta(\varepsilon^{\vec{y}} - \|\vec{y}_i - \vec{y}_j\|), \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (\text{II.12})$$

Ou plus généralement pour N systèmes est en utilisant l'équation (II.10), la matrice à multi variable de récurrence jointe peut être introduite par :

$$JR_{i,j}^{\vec{x}(1,\dots,n)}(\varepsilon^{\vec{x}_1}, \dots, \varepsilon^{\vec{x}_n}) = \prod R_{i,j}^{\vec{x}(k)}(\varepsilon^{\vec{x}(k)}), \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (\text{II.13})$$

Dans cette approche, une récurrence va prendre place si un point \vec{x}_j dans la première trajectoire revient au voisinage d'un ancien point \vec{x}_i , simultanément un point \vec{y}_j de la seconde trajectoire revient au voisinage de l'ancien point \vec{y}_i . Cela signifie, que la probabilité jointe que les deux récurrences (ou n récurrences, dans le cas multidimensionnelle) se produit simultanément dans leurs phases spatiales respectives est étudiée.

La représentation graphique de la matrice $JR_{i,j}$ est appelée **JRP**. La définition de la RP est une définition d'un cas spéciale de la JRP pour un seul système seulement.

De cette façon, si les systèmes sont physiquement différents (par exemple ils peuvent avoir des phases spatiales différentes d_1, \dots, d_n ou peuvent être reconstruite d'après différents observables physiques), la récurrence jointe est encore bien définie, en contraste de la récurrence croisée.

Par ailleurs, la JRP est invariante sous la permutation des coordonnées dans l'un ou chacun des deux systèmes considérés.

D'ailleurs, une version retardée de la matrice de récurrence jointe peut être introduite :

$$JR_{i,j}^{\vec{x},\vec{y}}(\varepsilon^{\vec{x}}, \varepsilon^{\vec{y}}, \tau) = JR_{i,j}^{\vec{x}}(\varepsilon^{\vec{x}})JR_{i+\tau,j+\tau}^{\vec{y}}(\varepsilon^{\vec{y}}), \quad i, j = 1, \dots, N - \tau, \quad (\text{II.14})$$

Ce qui est le plus utilisé pour l'analyse des systèmes retardés en interaction (exemple pour la synchronisation de retard) [54,55], ou encore pour les systèmes à rétroaction.

La JRP peut encore être calculée en utilisant une quantité fixée des voisinages les plus proches. Ensuite, chaque RP qui contribue à la JRP finale est calculée en utilisant le même nombre pour les voisinages les plus proches.

II.6. Comparaison entre la CRP et la JRP

Afin d'illustrer la différence entre la CRP et la JRP, on considère la trajectoire de la phase spatiale du système de Rössler dans trois situation différentes : la trajectoire originale (figure II.11.A), la trajectoire tournée sur l'axe z (figure II.11.B) et la trajectoire sous un étirage/compression parabolique de l'échelle temporelle (figure II.11.C). Ces trois trajectoires semblent très similaires, l'une d'elles est tournée et l'autre contient une paramétrisation temporelle différente (mais semble identique à la trajectoire originale de la phase temporelle).

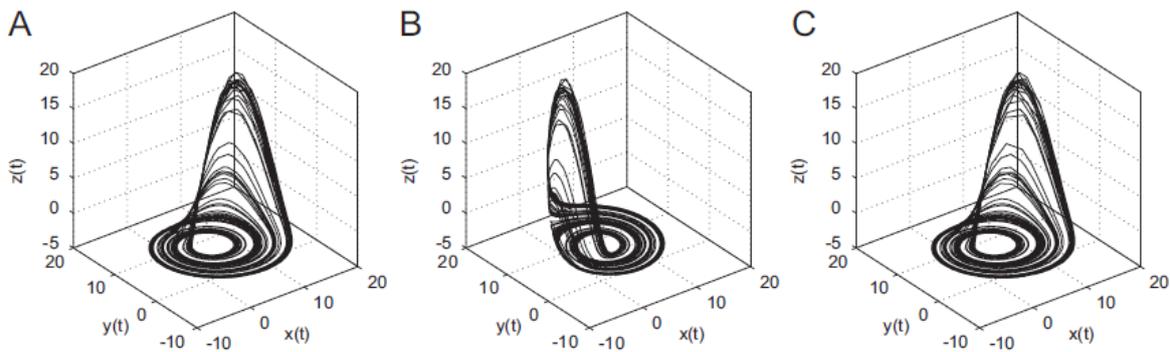


Figure II.11. (A) Trajectoire de phase spatiale du système de Rössler (attracteur avec $a=15, b=0.2$ et $c=10$), (B) Même trajectoires que dans (A) mais tournée de $\frac{3}{5}\pi$ sur l'axe z , (C) Même trajectoire que dans (A) mais échelle temporelle transformée par $\tilde{t} = t^2$.

Tout d'abord, voyant la RP des trois trajectoires. La RP de la trajectoire originale est identique à la RP de celle tournée (figure II.12.A et B). La RP de la trajectoire étirée/compressée semble différente de celle de l'originale (figure II.12.C) : elle contient des lignes arquées, car les structures récurrentes sont décalées et étirées dans le temps en ce qui concerne la RP originale.

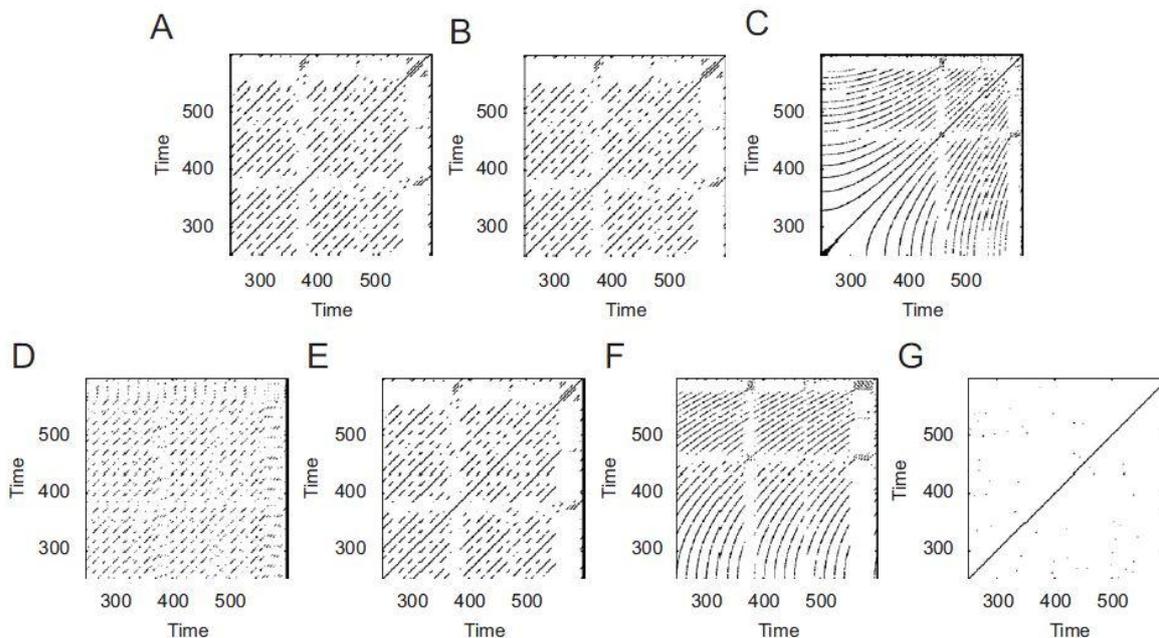


Figure II.12. La RP de (A) trajectoire originale du système Rössler, (B) de la trajectoire tournée et (C) de la trajectoire étirée/compressée. (D) CRP et (E) JRP des trajectoires originales et tournées et (F) CRP et (G) JRP des trajectoires originale et étirée/compressée. Le seuil de récurrence est $\varepsilon = 1$.

Maintenant on calcule la CRP entre la trajectoire originale et la tournée (Figure II.12.D) et on observe, que c'est assez différent de la RP de la trajectoire originale (Figure II.12.A). Car dans la CRP, la différence entre chaque paire de vecteurs est calculée, et cette différence n'est pas invariante sous la rotation d'un des systèmes. Ainsi, une rotation du système de référence d'une trajectoire change la CRP. Donc, La CRP ne peut pas détecter que les deux trajectoires sont identiques jusqu'à une rotation. En revanche, la JRP considère les récurrences jointes, c'est-à-dire la récurrence se produisant simultanément dans les deux systèmes. Elles sont invariantes pour des transformations géométriques.

La CRP entre la trajectoire originale et celle étirée/compressée contient la LOS arquée, qui révèle la forme fonctionnelle de la transformation parabolique de l'échelle temporelle (Figure II.12.F). On note que la CRP représente les temps pour lesquels les deux trajectoires visitent la même région de l'espace spatiale. D'une part, la JRP de ces trajectoires est presque vide (Figure II.12.G) parce que la structure récurrente des deux systèmes est maintenant différente. Donc, la JRP n'est pas capable de détecter la transformation temporelle appliquée à la trajectoire, même si la forme de la trajectoire de phase spatiale est très similaire.

Pour conclure, nous pouvons énoncer que la CRP est plus adaptée pour l'étude des relations entre les parties du même système qui ont été sujet à différents procédés physiques et

mécaniques, par exemple, deux noyaux de forage dans un lac soumis à différent taux de compression. D'autre par, la JRP est plus appropriée pour l'étude de deux systèmes d'interaction qui s'influencent mutuellement, et ainsi, s'adapter l'un à l'autre. Par exemple, dans le cadre de la phase et de la synchronisation généralisée [28].

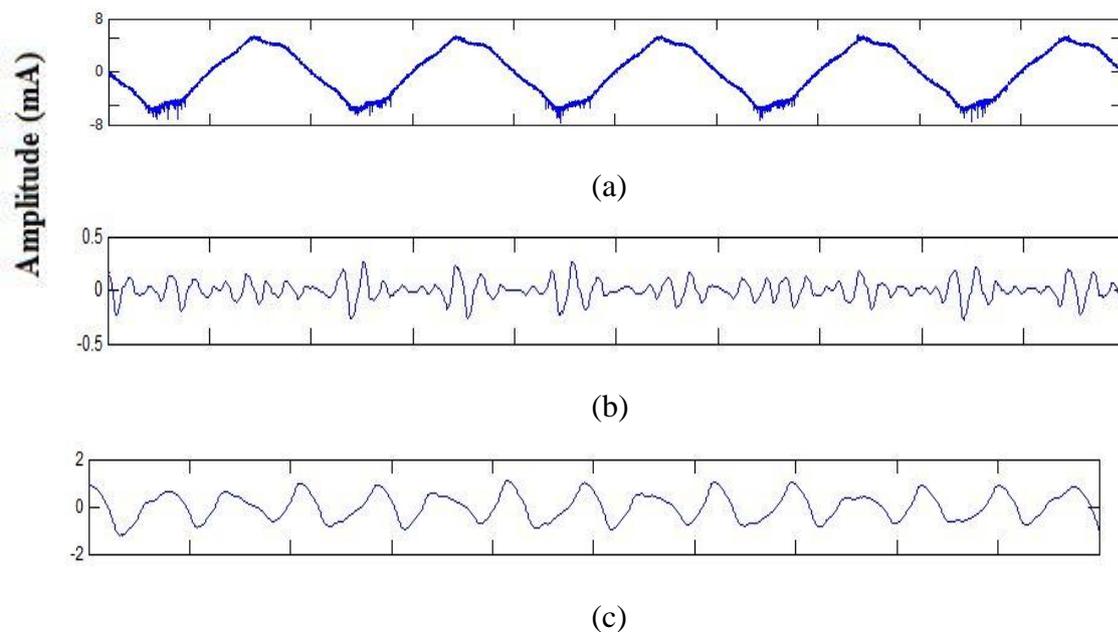
II.7. La technique RP appliquée au détail du signal du courant de fuite

Dans notre travail, nous allons appliquer la DWT en utilisant l'ondelette de *Daubechies 4* pour décomposer le signal du courant de fuite afin d'identifier les transitions des décharges pour la pollution non-uniforme, qui sont causées par des perturbations de hautes fréquences [56].

La décomposition fréquentielle du signal de courant de fuite s'avère être nécessaire avant d'utiliser la technique RP. Différents détails correspondant aux différents niveaux de décomposition sont donc extraits.

On décompose le signal du courant de fuite précédant un contournement par la DWT à l'aide de l'ondelette *Daubechies 4* jusqu'à 10 niveaux. On extrait alors les différents détails correspondant aux différentes bandes de fréquences.

On appliquera la technique RP aux différents niveaux de décomposition obtenus, comme montré sur la figure II.13. Dans cette partie, les résultats sont obtenus en exploitant l'ensemble de signaux G1Mod1 (annexe A).



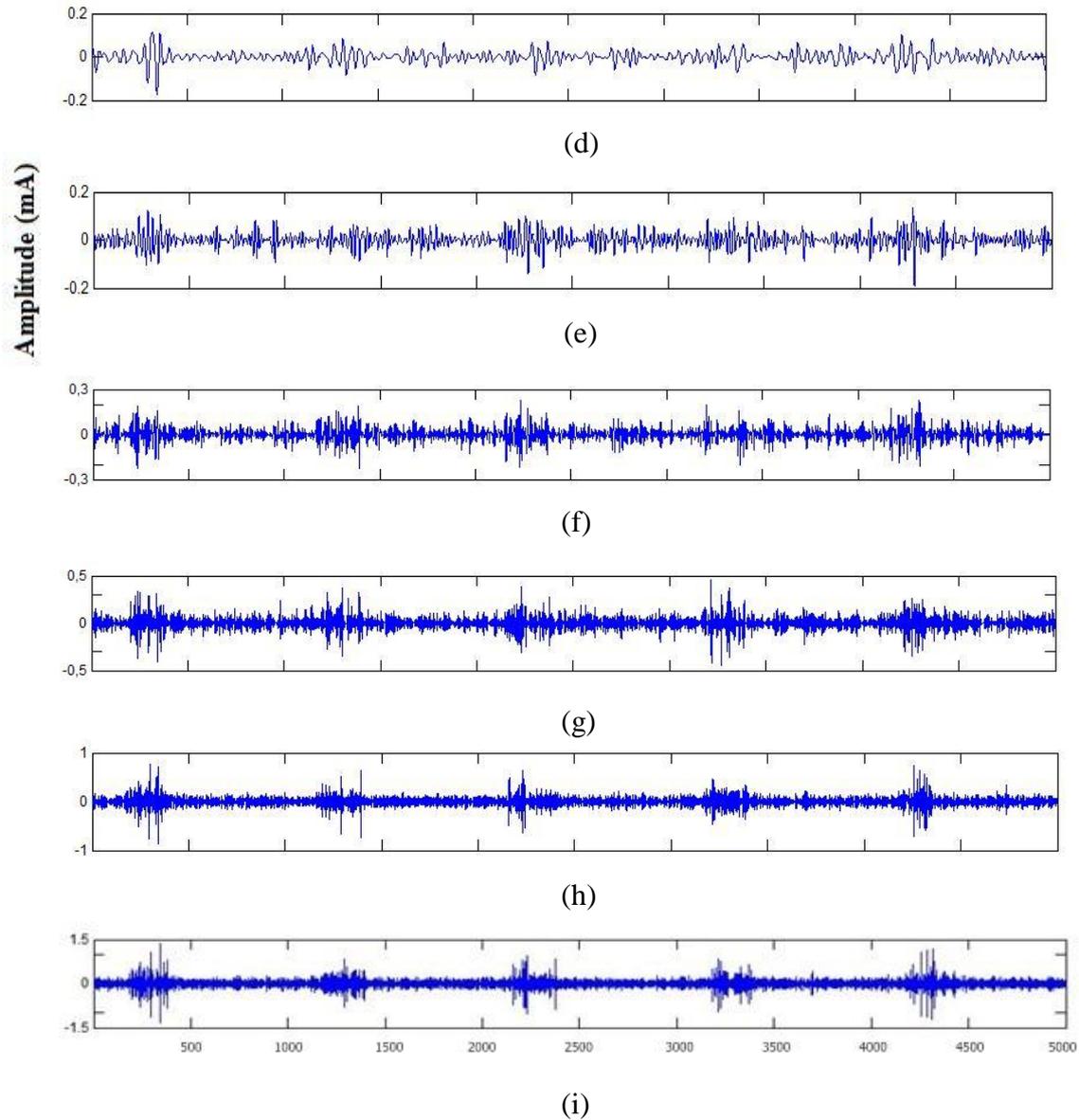


Figure II.13. Extraction des composantes fréquentielles du courant de fuite précédant le contournement: (a) indique le signal de courant de fuite, (b) définit le coefficient D_{10} (50 Hz), (c) définit D_8 (390- 1953 Hz), (d) définit D_6 (781 – 1562 Hz), (e) définit D_5 (1,56 – 3,12 kHz), (f) définit D_4 (3,12 – 6,25 kHz), (g) définit D_3 (6,25 – 12,5 kHz), (h) définit D_2 (12,5 - 25 kHz), (i) définit D_1 (25 - 50 kHz).

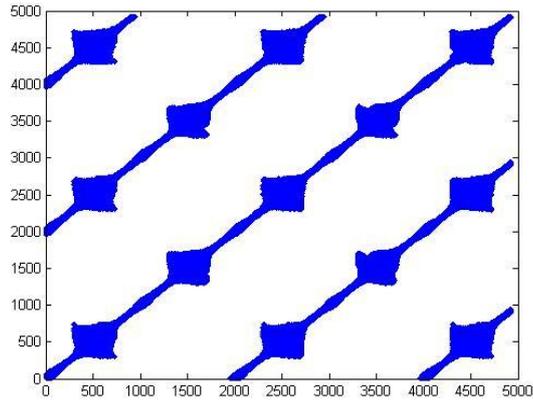
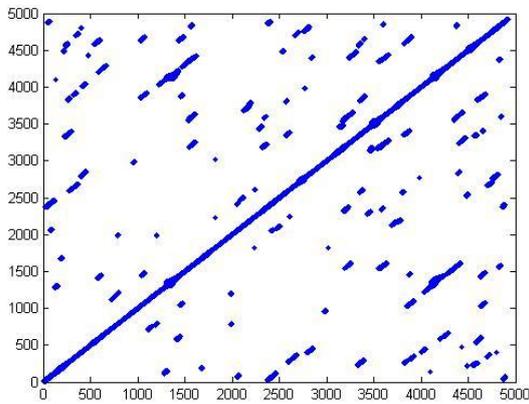
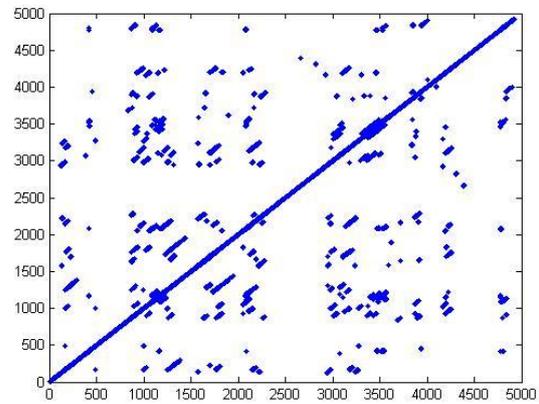


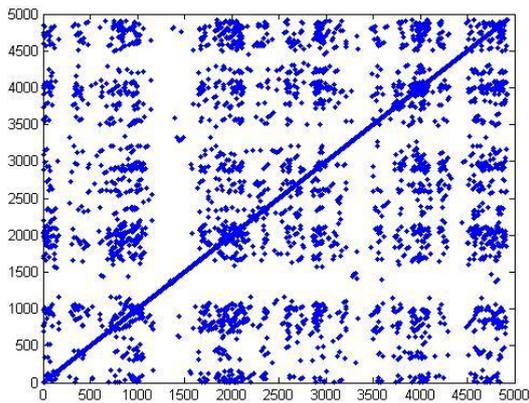
Figure II.14. la technique RP appliquée directement sur le signal du courant de fuite.



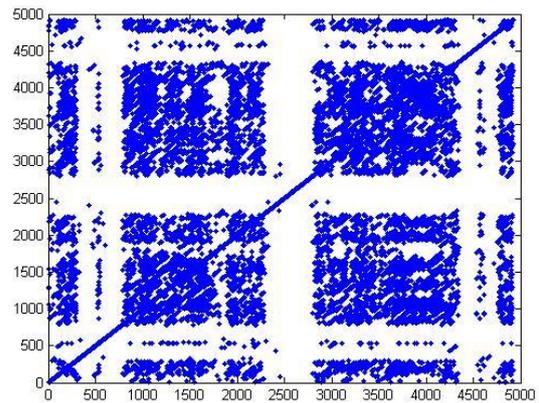
(a)



(b)



(c)



(d)

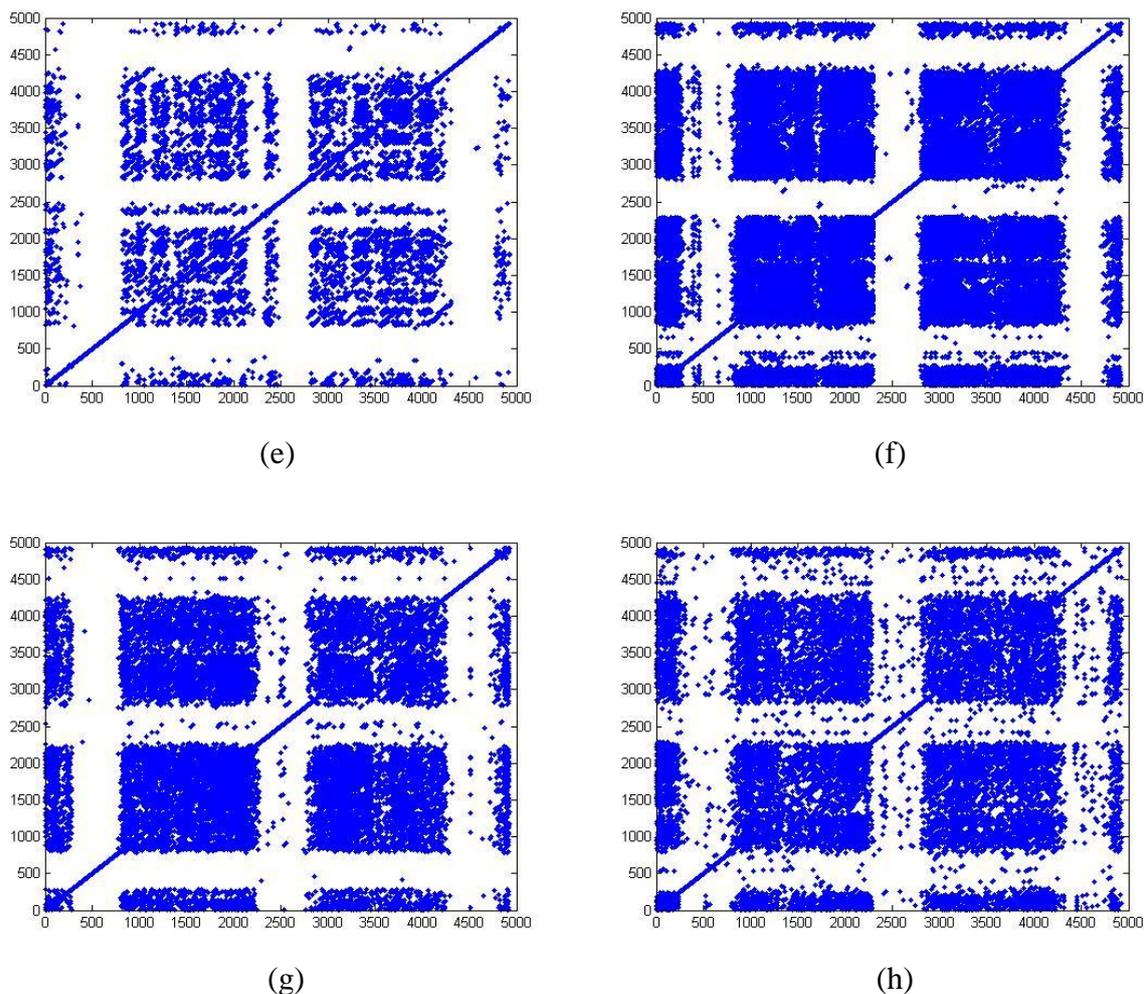


Figure II.15. RP de la décomposition en ondelettes du signal du courant de fuite (a) définit le coefficient $D10(50 \text{ Hz})$, (b) définit $D8(390-1953 \text{ Hz})$, (c) définit $D6(781-1562 \text{ Hz})$, (d) définit $D5(1,56-3,12 \text{ kHz})$, (e) définit $D4(3,12-6,25 \text{ kHz})$, (f) définit $D3(6,25-12,5 \text{ kHz})$, (g) définit $D2(12,5-25 \text{ kHz})$, (h) définit $D1(25-50 \text{ kHz})$.

Les études déjà menées [57,58] ont montré que les composantes fréquentielles peuvent être séparées en trois intervalles : basses (ch1 à ch3), moyennes (ch4 à ch7) et hautes fréquences (ch8).

Pour les basses fréquences (50 – 1562 Hz) :

La figure II.15.a présente des structures pauvres. Elle est composée de quelques points ainsi que des fragments de lignes parallèles à la LOI. L'interprétation de cette structure indique très peu de décharges électriques sur la surface de l'isolateur, ces décharges suivent un comportement déterministe et cela d'après les courtes lignes diagonales. Cette interprétation est totalement en contradiction avec ce qui se passe réellement et même avec la théorie.

La figure II.15.b se rapportant au ch2, les fragments des diagonales se rassemble et deviennent plus denses, mais cela reste loin de la réalité, aussi, des bandes blanches sont visiblement nette, cela peut être interprétée par un état de transition certain, ce qui suit la théorie.

Pour la figure II.15.c, la dernière structure pour les basses fréquences, diffère des deux précédentes, les lignes diagonales à la LOI ont presque disparues, le nombre de points a augmenté un peu, mais reste toujours loin de refléter la réalité. Par ailleurs, les bandes blanches sont toujours présentes, ce qui suit toujours la théorie. Toutefois, bien que ces figures suivent la théorie pour ce qui est de l'état de transition imminent (bandes blanches bien dessinées), on se retrouve face à des contradictions. Le nombre de points bien insuffisant pour refléter l'activité des décharges superficielles réelle. La deuxième contradiction étant les fragments des lignes diagonales parallèles à la LOI, ce qui en désaccord avec la théorie.

Pour les moyennes fréquences (1,56 – 25 kHz) :

Les bandes blanches sont toujours présentes, ce qui indique l'imminence de l'état de transition. La figure II.15.d, les points se densifie grandement ce qui signifierait une forte activité des décharges superficielles toute fois avec la présence de zones blanches (vide) dans ces structures.

La figure II.15.e, paraît similaire à la précédente, mis à part la plus grande concentration des points et la diminution des vides internes ce qui traduit toujours de fortes décharges superficielles, ceci ne reflète pas concrètement la réalité.

Concernant les figures II.15.f et II.15.g, les deux structure sont pratiquement similaires devenu opaques à cause de la forte densité de points. Ceci se traduit par une très forte activité des décharges superficielles. On pourrait utiliser les moyennes fréquences dans notre étude mais cette dernière sera faussée car cette activité est trop intense par rapport à la réalité.

La figure II.15.h, correspond au RP des hautes fréquences (25 – 50 kHz), cette structure semble la même que celle pour les moyennes fréquences mais la seule différence réside au niveau de l'absence de l'opacité. Présente dans les structures précédentes, cela traduit en réalité des

décharges superficielles intenses ainsi que quelques décharges de faible intensité. Elles se préconisent sur la RP comme des points isolés. Cela suit aussi la théorie, les bandes blanches sont toujours bien visibles, un état de transition imminent [59].

Donc on pourra conclure que pour chaque palier de fréquence, la RP donne une représentation différente qui ne peut pas être toujours associée aux décharges superficielles et au contournement. Pour les basses fréquences la RP est inadéquate, vue que l'interprétation est totalement contradictoire pour ce qui se passe réellement.

Pour les moyennes fréquences, la RP peut être utilisable, toute fois l'interprétation sera profondément faussée, une structure si opaque décrit maladroitement l'activité des décharges au niveau de l'isolateur. Ainsi les hautes fréquences correspondantes au détail D1. Elles nous donnent la meilleure interprétation possible pour ce qui se passe réellement sur la surface de l'isolateur.

Conclusion

On est arrivé d'après cette théorie, que la RP et ses applications peuvent être utilisées de manière à donner de bons résultats concernant le diagnostic des décharges électrique et du phénomène de contournement.

Nous allons essayer d'utiliser des dérivées de cette méthode tel que la CRP et la JRP afin d'arriver à diagnostiquer de façon précise le degré de pollution donc sa classe, en étudiant les différents phénomènes qui sont en relation directe avec elle, tel que les décharges superficielle et les décharges partielles.

Chapitre III :

Application de la RP, CRP et JRP sur les signaux du courant de fuite, de la tension appliquée et de la charge électrique

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter la majeure partie de notre travail, qui est le diagnostic de l'état de pollution d'une surface plane d'un isolateur. Cela par l'étude de la RP et de la JRP appliquées aux signaux du courant de fuite, de la tension appliquée et de la charge électrique pour les différentes classes de pollution et différents niveaux de tensions appliquées. Cette étude a pour but d'obtenir une corrélation directe entre les résultats obtenus et l'état de surface du modèle plan de l'isolateur. Pour cela, nous avons décomposé notre travail en trois parties :

La première, concerne la RP du signal du courant de fuite pour les trois classes de pollution à différents niveaux de tensions appliquées. Vu que notre travail est basé essentiellement sur le courant de fuite, la JRP sera utilisée comme une étude comparative de deux RP.

La deuxième partie porte sur la CRP et la JRP des signaux du courant de fuite et de la charge électrique. C'est la que nous avons menés une petite comparaison entre ces deux méthodes pour voir laquelle des deux donne les résultats les mieux adaptés à notre diagnostic.

La troisième partie porte sur la JRP du signal de la tension appliquée, une fois avec celui du courant de fuite et l'autre avec celui de la charge électrique. Cette partie nous permet de tirer quels sont les signaux qui donnent les meilleurs résultats.

On notera que désormais, dans ce chapitre, la technique RP ainsi que la CRP et la JRP seront exclusivement appliquées au détail haute fréquence D1 résultant de la décomposition préalable à l'aide de la DWT du signal de courant de fuite en utilisant l'ondelette de *Daubechies 4*.

III.1. Les applications de la RP sur le signal de courant de fuite et ses CRP et JRP avec le signal de la charge électrique

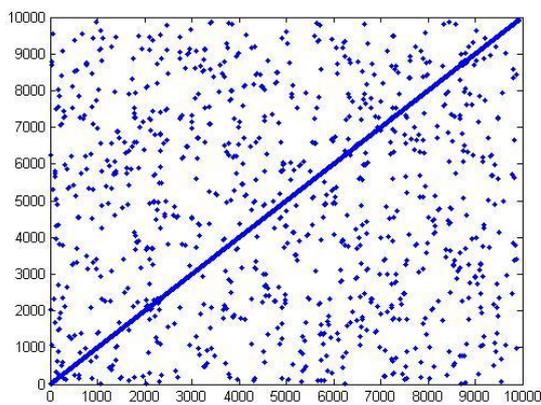
Pour notre étude des différentes RP en fonction des classes de pollutions, nous avons utilisé la base de données **G1Mod1** pour la technique RP et les bases de données **G1Mod1** et **G2Mod1** (annexe A) pour la CRP et la JRP.

III.1.1. RP de la composante haute fréquence du signal de courant de fuite

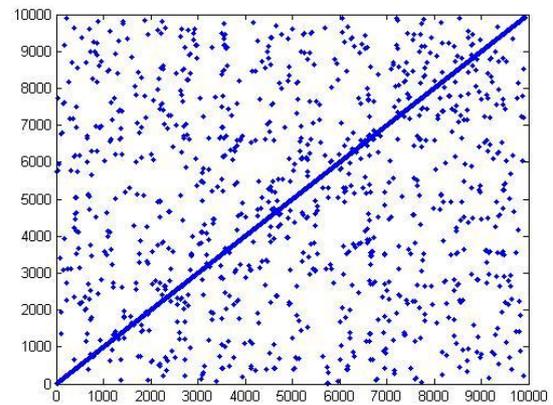
On applique la technique RP sur le détail D1 (cf. chapitre II) du courant de fuite pour les trois classes de pollution à différents niveaux de tensions appliquées.

III.1.1.1. Cas d'une pollution de classe 1

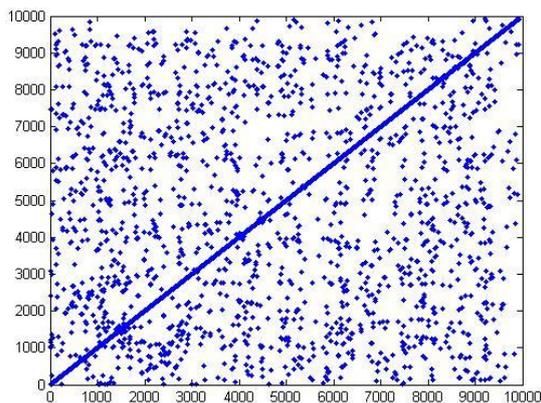
Pour cette classe de pollution, on s'intéressera à un signal du courant de fuite sous une pollution non uniforme d'une conductivité de 3,5mS/cm.



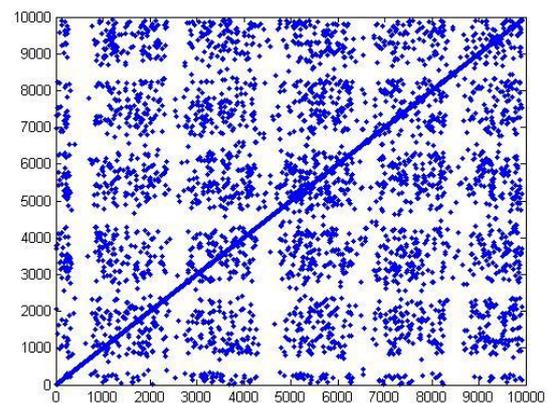
(a)



(b)



(c)



(d)

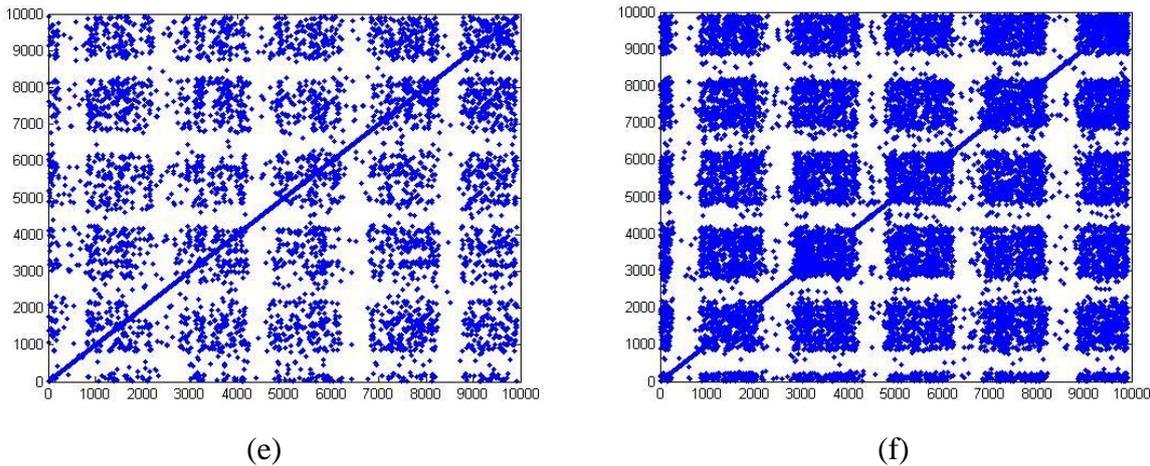


Figure III.1. RP de la composante haute fréquence (D1) en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 1 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff, (f) 30kVeff.

D'après les figures III.1 et suivant l'analyse visuelle, nous avons interprété de la façon la plus plausible les résultats que nous avons eus de la RP du détail D1 du courant de fuite.

La figure III.1.a de tension appliquée de 5kVeff, est caractérisée par un petit nombre de points éparpillés. Une telle structure schématise le nombre très petits voir rares des décharges de surface apparaissant lors des essais. Toutefois ces décharges étant faibles et localisées autour des zones propres, la probabilité pour que l'arc électrique se produise reste infime ce qui nous amène à élever les niveaux de tension afin de pouvoir remarquer les paramètres décrivant cet arc dans la RP.

Dans la figure III.1.b, où la tension appliquée est de 10kVeff, de structure très semblable à celle de la figure 1.a, avec une légère augmentation du nombre de points vue l'élévation de la tension appliquée. Toutefois, cela reste insuffisant pour l'apparition de l'arc ou le contournement.

Dans la figure III.1.c, où la tension appliquée est de 15kVeff, la structure reste assez éparpillée même si le nombre de points a significativement augmenté et qu'ils sont devenus plus denses. Ce qui nous incite d'autant plus à relier directement ce phénomène aux décharges superficielles, car elles aussi se sont intensifiées pour ce niveau de tension, mais tout de même sans pouvoir donner naissance à l'arc électrique.

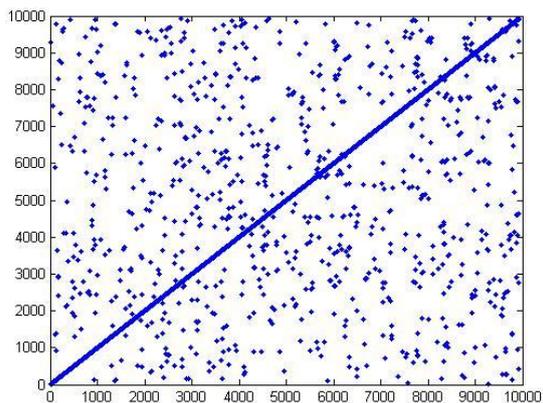
Dans la figure III.1.d, où la tension appliquée est de $20kV_{eff}$, nous donne une nouvelle structure bien différente des deux premières, plus ordonnée. Les points sont plus denses dans des espaces de formes rectangulaires, bien que très grossières. Cela dit, on remarque l'apparition de bandes blanches toute aussi grossières mais tout de mêmes visibles, celles-ci caractérisent l'arrivée d'un état de transition certain. Cette structure explique très bien ce qui est entrain de se passer physiquement, des décharges superficielles plus intenses (points plus denses), ces décharges sont de plus en plus intermittentes et la surface est devenue saturée ce qui laisse prévoir une apparition imminente de l'arc électrique.

Dans la figure III.1.e, où la tension appliquée est de $25kV_{eff}$, bien que très similaire à la précédente, cette structure est plus affinée moins grossière, tout de même avec une diminution de la densité des points. Physiquement, nous avons l'apparition de petits arcs électriques dans les zones propres remplaçant les décharges superficielles qui diminuent.

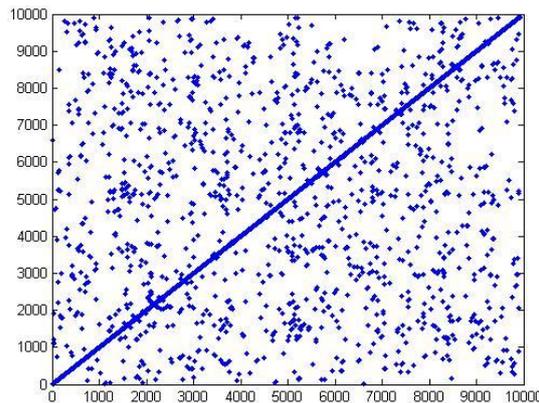
Finalement, la figure III.1.f, avec une tension de $30kV_{eff}$, représente une structure encore plus affinée, avec tout de même cette fois une très grande densité de points séparés par des bandes blanches bien dessinées. Cette structure définit ce qui se passe sur l'isolateur par le fait de la présence des décharges de fortes intensités sur sa surface et l'état fort intermittent que soulignent les bandes blanches. Tout cela nous amène à l'imminence du claquage, c'est-à-dire la formation de l'arc électrique de contournement.

III.1.1.2. Cas d'une pollution de classe 2

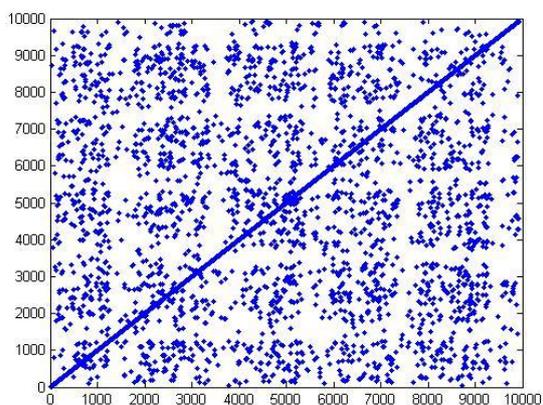
Pour cette classe de pollution, nous nous intéresserons au RP du signal du courant de fuite sous une pollution non uniforme d'une conductivité de $6mS/cm$.



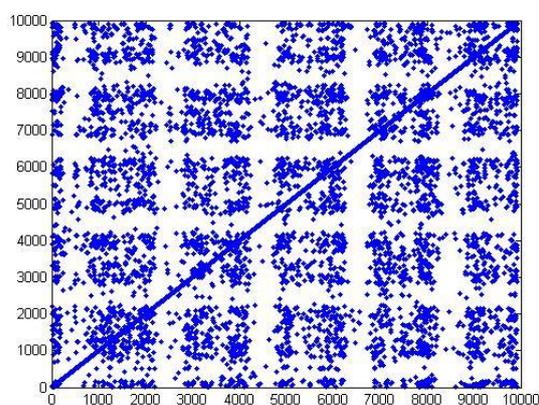
(a)



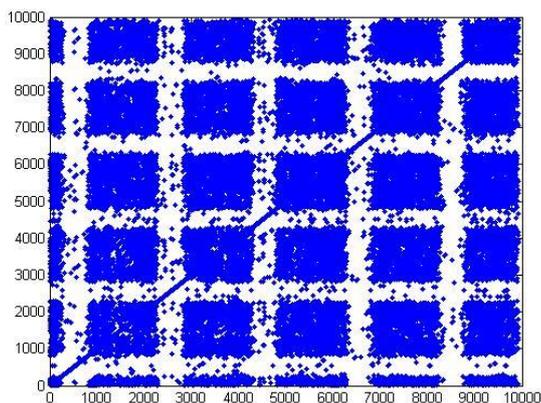
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure III.4. RP des composantes hautes fréquences (D1) du signal du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 2 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff.

D'après les figures III.4 et suivant l'analyse visuelle, nous allons continuer d'interpréter de la façon la plus plausible les résultats que nous avons eus de la RP du détail D1 du courant de fuite, cette fois pour une pollution de classe 2.

Figure III.4.a, tension appliquée de $5kV_{eff}$, toujours avec un petit nombre de points éparpillés. Une telle structure explique le nombre très petits voir rares des décharges superficielles apparaissant lors des essais.

Toutefois, ces décharges étant faibles et localisées autour des zones propres, l'arc électrique est très loin de se produire.

Dans la figure III.4.b, où la tension appliquée est de $10kV_{eff}$, même si la tension fut élevée la structure diffère de la figure 4.a, par une légère augmentation du nombre de points. Dans ce cas, aussi le contournement n'est pas encore envisageable.

Pour la figure III.4.c, la tension appliquée est de $15kV_{eff}$, définie par une structure plus dense que les premières et bien moins éparpillée. Le nombre de points a significativement augmenté et s'est intensifié, ce qui explique directement les décharges superficielles devenues plus intenses et plus intermittentes. La surface est devenue saturée pour ce niveau de tension, avec tout de même la présence de bandes blanches encore très grossières et mal définies. Celles-ci indiquent l'arrivée d'un état de transition, malgré que cela reste insuffisant pour donner naissance à l'arc électrique, qui tout de même n'est plus très loin.

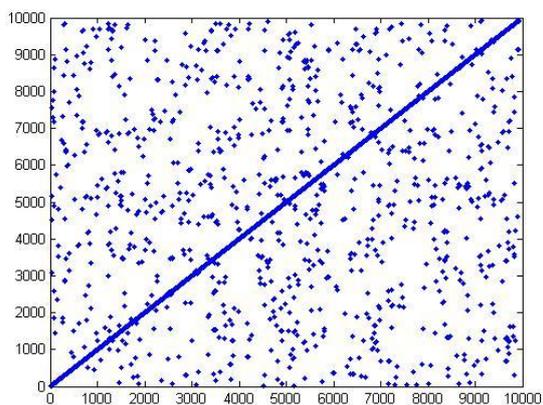
Dans le cas de la figure III.4.d, où la tension appliquée est de $20kV_{eff}$, nous avons une structure bien plus affinée que la précédente. Les points se densifient dans des espaces de formes rectangulaires moins grossières, cela dit, on remarque la distinction des bandes blanches un peu grossières mais bien visibles, qui caractérisent l'approche d'un état de transition certain. Cela laisse prévoir l'apparition imminente de l'arc électrique.

Finalement, dans la figure III.4.e, tension appliquée est de $25kV_{eff}$, bien que de même nature que la précédente cette structure est bien plus affinée, ayant une très grande densité de points. Cela est remarquable physiquement par la production de décharges de fortes intensités dans les zones propres. Ainsi, avec l'état fort intermittent que préconisent les bandes blanches,

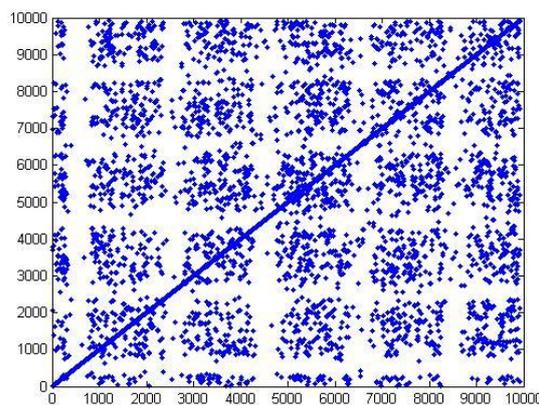
l'imminence du claquage et quasi ressenti, début de formation de l'arc électrique de contournement.

III.1.1.3. Cas d'une pollution de classe 3

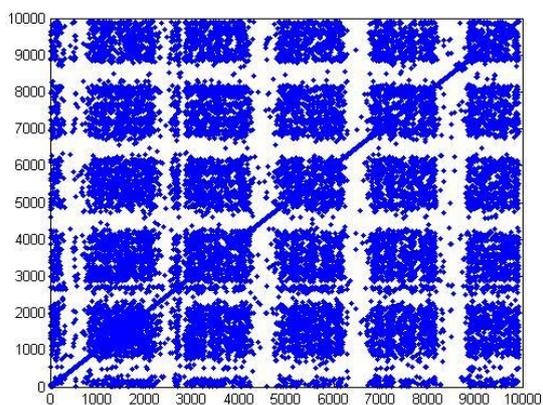
Pour cette classe de pollution, nous nous intéresserons au RP du signal du courant de fuite sous une pollution non uniforme d'une conductivité de 20mS/cm.



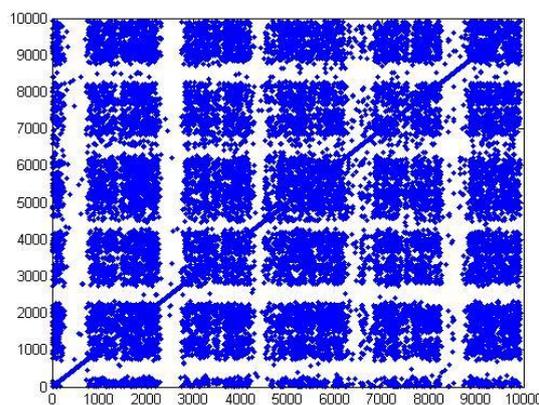
(a)



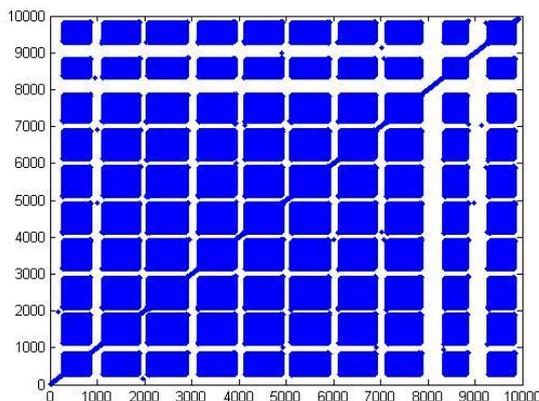
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure III.7. RP des composantes hautes fréquences (D1) en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 3 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff.

Les figures III.7 montrent les différents RP des composantes hautes fréquences du détail D1 (25 à 50 kHz) pour une pollution de classe 3.

D'après la figure III.7.a, pour une faible tension de 5kVeff appliquée aux bornes de l'isolateur, la structure éparpillée et toujours de mise, elle indique la faible activité des décharges à la surface de l'isolateur.

Pour la figure III.7.b, où la une tension appliquée est de 10kVeff, l'augmentation du nombre de points et accompagnée d'un changement de structure. Celle-ci est caractérisée par un début de formation des bandes blanches. Une telle structure n'apparait pas si prématurément pour un tel bas niveau de tension, cela est du à la sévérité de pollution. Cette structure annonce la présence d'un état non stationnaire. Cela relate ce qui arrive en pratique, des décharges surfaciques plus prononcées avec un état de contournement proche par rapport à un tel niveau de tension.

Dans la figure III.7.c, pour une tension appliquée de 15kVeff, nous observons une même structure que précédemment, plus dense avec des bandes blanches mieux établies. Cela est dû à l'augmentation des décharges surfaciques, et le contournement et d'autant plus proche vue la distinction des bandes blanches.

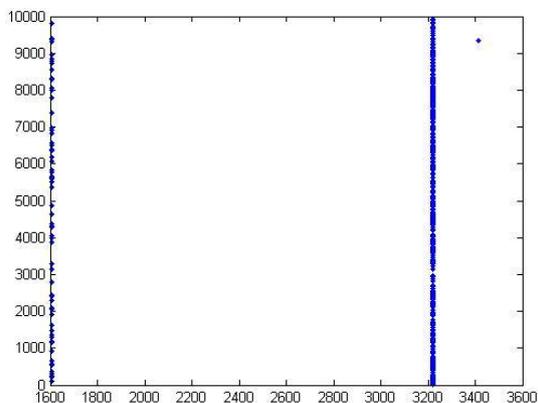
Par contre, la figure III.7.d d'une tension appliquée de $20kV_{eff}$, montre une structure encore mieux affinée. On a les mêmes bandes blanches avec un peu plus d'intensité dans les points. Ce qui caractérise les décharges très intenses et de plus en plus intermittentes. La saturation complète des bandes propres est prématurée pour un tel niveau de tension. De cet état, on peut prévoir une future apparition d'arcs électriques.

Pour une tension appliquée supérieure ($25kV_{eff}$), la figure III.7.e représente une structure pouvant être qualifiée de particulière même si elle ressemble à la précédente. Toutefois, sa particularité réside dans le fait qu'elle est parfaite du point de vue de la densité et du contraste créée par les bandes blanches. Ce cas est différent des autres pollutions qui comportent une phase où la densité des décharges superficielles diminuent de sorte que le phénomène de formation d'arc puisse se produire. Cette phase n'existe pas dans la troisième classe. Vue l'importance de cette classe de pollution, le contournement se fait sans formation d'arc électrique reliant les différentes décharges partielles, ce qui est logique étant donné aussi l'accroissement des décharges superficielles avec l'augmentation de la tension.

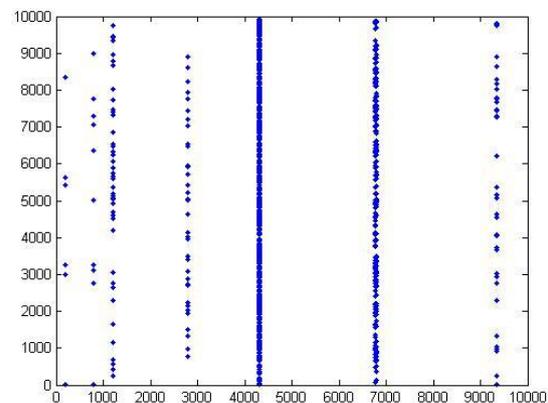
III.1.2. CRP des composantes hautes fréquences des signaux du courant de fuite et de la charge électrique

III.1.2.1. Cas d'une pollution de classe 1

Nous nous intéressons ici à un signal du courant de fuite et de la charge sous une pollution non uniforme d'une conductivité de $3,5mS/cm$.



(a)



(b)

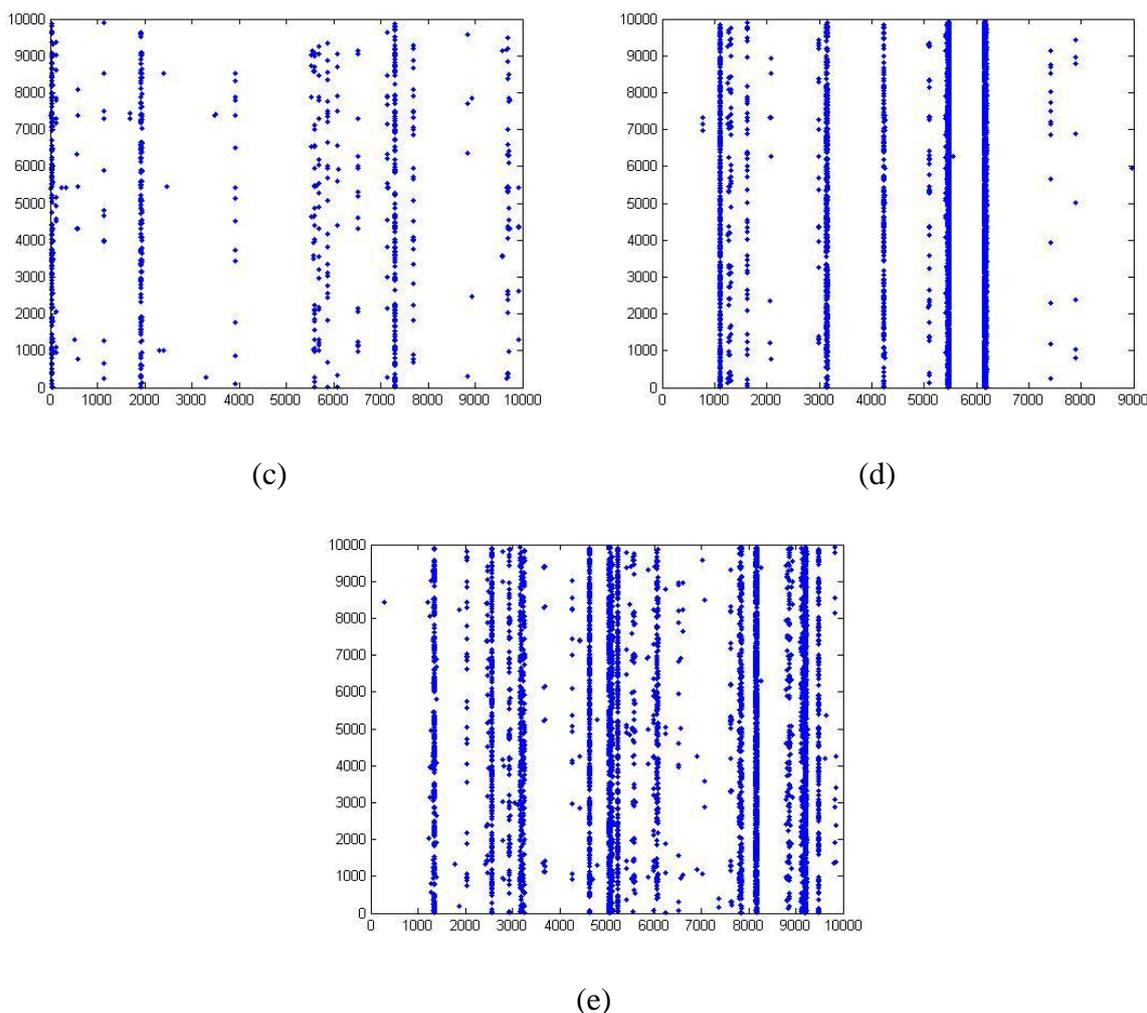


Figure III.5. CRP des composantes hautes fréquences (D1) en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 1: (a) 10kVeff, (b) 15kVeff, (c) 20kVeff, (d) 25kVeff, (e) 30kVeff.

La figure III.5 représente la CRP des composantes hautes fréquences (D1) en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 1. Notre interprétation portera sur la structure de cette CRP qui compare la récurrence entre les deux signaux celui du courant de fuite et celui de la charge électrique. Toutefois cette structure étant très pauvre, son interprétation ne sera pas assez enrichissante pour notre étude. C'est la cause pour laquelle nous nous sommes pas attardés sur cette méthode.

Toutes les structures de la CRP du signal du courant de fuite et de la charge électrique sont à base de lignes verticales. Celles-ci sont normalement diagonales donc décrivant un comportement périodique, ce redressement est due au fait que le signal du courant de fuite est déphasé par rapport à celui de la charge électrique et à cause de la dimension d'immersion de la

CRP qui doit être assez importante pour éviter les informations dues aux déformations non consistantes (tel que les bruits dûs aux interférences).

Pour la première figure III.5.a, dont la tension appliquée est de $10kV_{eff}$, on a une structure blanche à l'exception de quelques points formant une seule ligne verticale. En réalité, pour ce niveau de tension, on ne remarque rien mis à part la formation de quelques décharges superficielles bien peu intenses pour pouvoir donner naissance à des décharges superficielles.

Dans la figure III.5.b, où la tension appliquée est de $15kV_{eff}$, nous avons une structure qui ne change pas beaucoup, juste un petit accroissement du nombre de points et des lignes verticales. On a relié le nombre de décharges superficielles directement au nombre de points, et celui des décharges partielles aux lignes verticales. Plus ces lignes sont denses, plus les décharges sont intenses, c'est ce qui se passe en réalité. Toutefois, le contournement en lui-même reste loin pour ce niveau de tension.

Concernant la figure III.5.c, tension appliquée $20kV_{eff}$, la structure a changée. Le nombre de points a considérablement augmentés mais le nombre de ligne reste inchangé. Ce qui est en accord avec ce qui se passe physiquement, car le nombre de décharges partielles présentent sur les bandes propres n'augmente plus. Toutefois, les décharges superficielles augmentent et s'intensifient beaucoup plus. La formation de l'arc n'est plus très loin mais on ne peut pas la déceler dans cette CRP.

Pour la figure III.5.d, avec une tension de $25kV_{eff}$, le changement de structure est plus prononcé et la structure maintenant est presque toute autre, le nombre de points a radicalement augmenté et le nombre de lignes aussi. Cela explique le nombre et l'intensité importante des décharges superficielles, les décharges partielles augmente et leur intensité croit significativement.

La dernière figure III.5.e, tension $30kV_{eff}$, a une structure totalement différente. Le nombre de points n'augmente pas, mais celui des lignes verticales lui augmente et devient très grand par rapport aux structures précédentes. Physiquement le nombre des décharges superficielles reste le même, le changement est perceptible au niveau des décharges partielles. Celles-ci augmentent et s'intensifient et commencent à se relier afin de former l'arc électrique et donc produire le contournement de l'isolateur.

III.1.2.2. Cas d'une pollution de classe 2

Nous nous intéresserons à un signal du courant de fuite et de la tension sous une pollution non uniforme d'une conductivité de 6mS/cm.

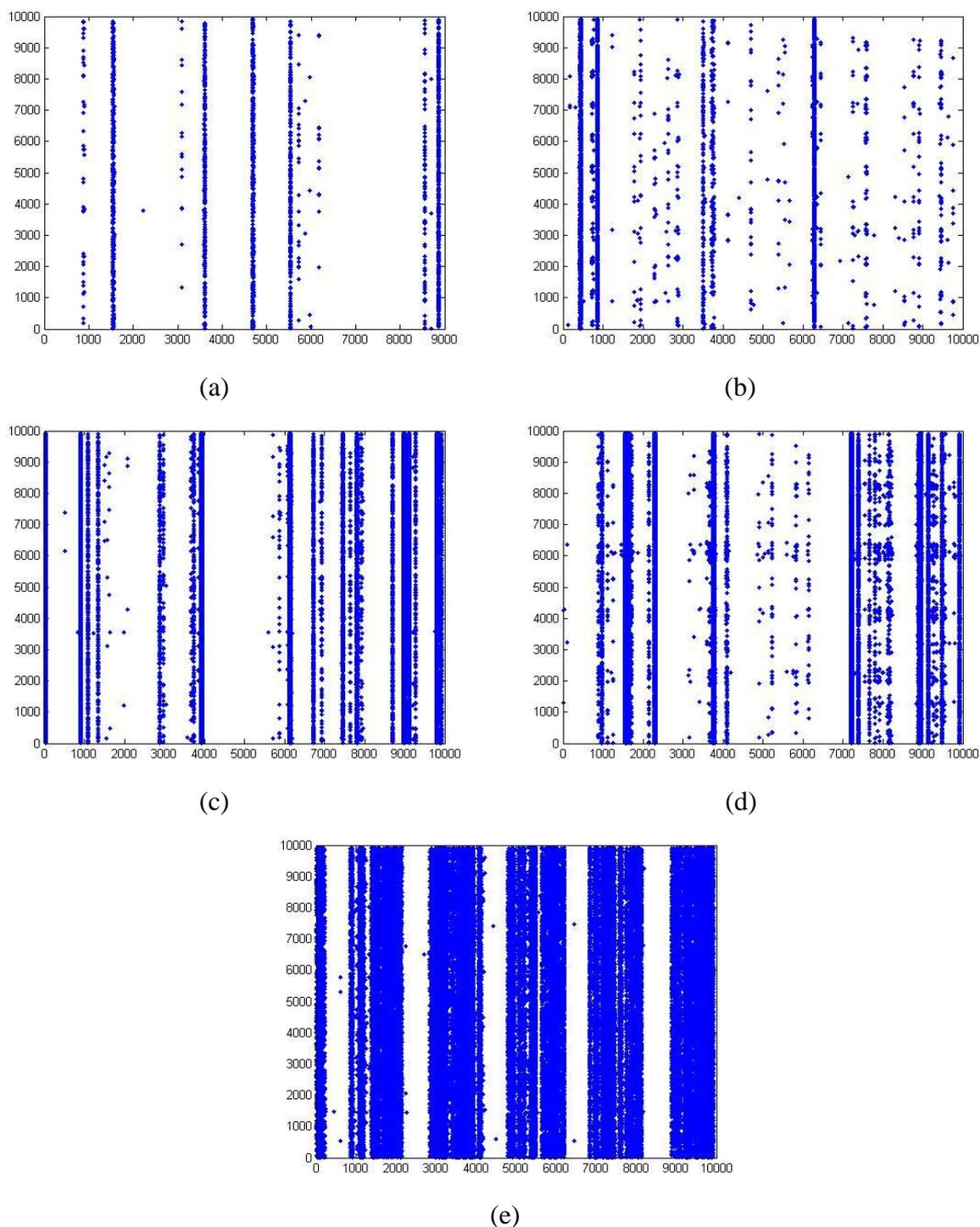


Figure III.2. CRP de la composante haute fréquence (D1) en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 2 : (a) 10kVeff, (b) 15kVeff, (c) 20kVeff, (d) 25kVeff, (e) 30kVeff.

La figure III.2 présentant la CRP du détail D1 du signal de la charge électrique et du courant de fuite pour différents niveaux de tension appliquée à l'isolateur.

La figure III.2.a où la tension appliquée est de 10kV $_{eff}$, montre une structure qui comporte un très faible nombre de points et de lignes verticales. Ceci reflète les rares et faibles décharges partielles qui apparaissent pour ce faible niveau de tension, ainsi que les quelques décharges superficielles qui les ont induites.

Pour la figure III.2.b dont la tension est égale à 15kV $_{eff}$, un nombre important de points caractérise sa structure, avec un nombre inchangé de lignes. Physiquement, c'est le nombre des décharges superficielles qui augmente sans altérer le nombre des décharges partielles qui reste quasi constant dans les bandes propres présentes sur la surface de l'isolateur.

Dans la figure III.2.c, dont la tension est de 20kV $_{eff}$, la structure est caractérisée par le décroissement du nombre de points qui sont remplacés par des lignes verticales. Pour ce niveau de tension, le nombre de décharges superficielles semble décroître, car ces dernières forment maintenant les décharges partielles qui ont considérablement augmenté en nombre. Le contournement en lui-même n'est plus très loin.

Dans la figure III.5.d, où la tension appliquée est de 25kV $_{eff}$, la structure ne se différencie de la précédente que par l'augmentation du nombre de points, celui des lignes reste le même. Cela est en accord avec la réalité, car les décharges superficielles augmentent en nombre et en intensité. C'est le début de la liaison des décharges partielles entre elle, formant l'arc électrique qui produit le contournement.

En finale, la figure III.5.e, où la tension est de 30kV $_{eff}$, montre une structure totalement différente. Un très grand nombre de lignes verticales très denses formant des bandes pleines la caractérise, et les points isolés sont presque inexistant. En réalité les décharges partielles sont de très grandes intensités reliées les unes aux autres, formant l'arc électrique de contournement. On peut dire que cette structure est celle de l'arc de contournement électrique de l'isolateur.

III.1.2.3. Cas d'une pollution de classe 3

Nous nous intéressons dans ce cas à un signal du courant de fuite et de la charge sous une pollution non uniforme d'une conductivité de 20mS/cm.

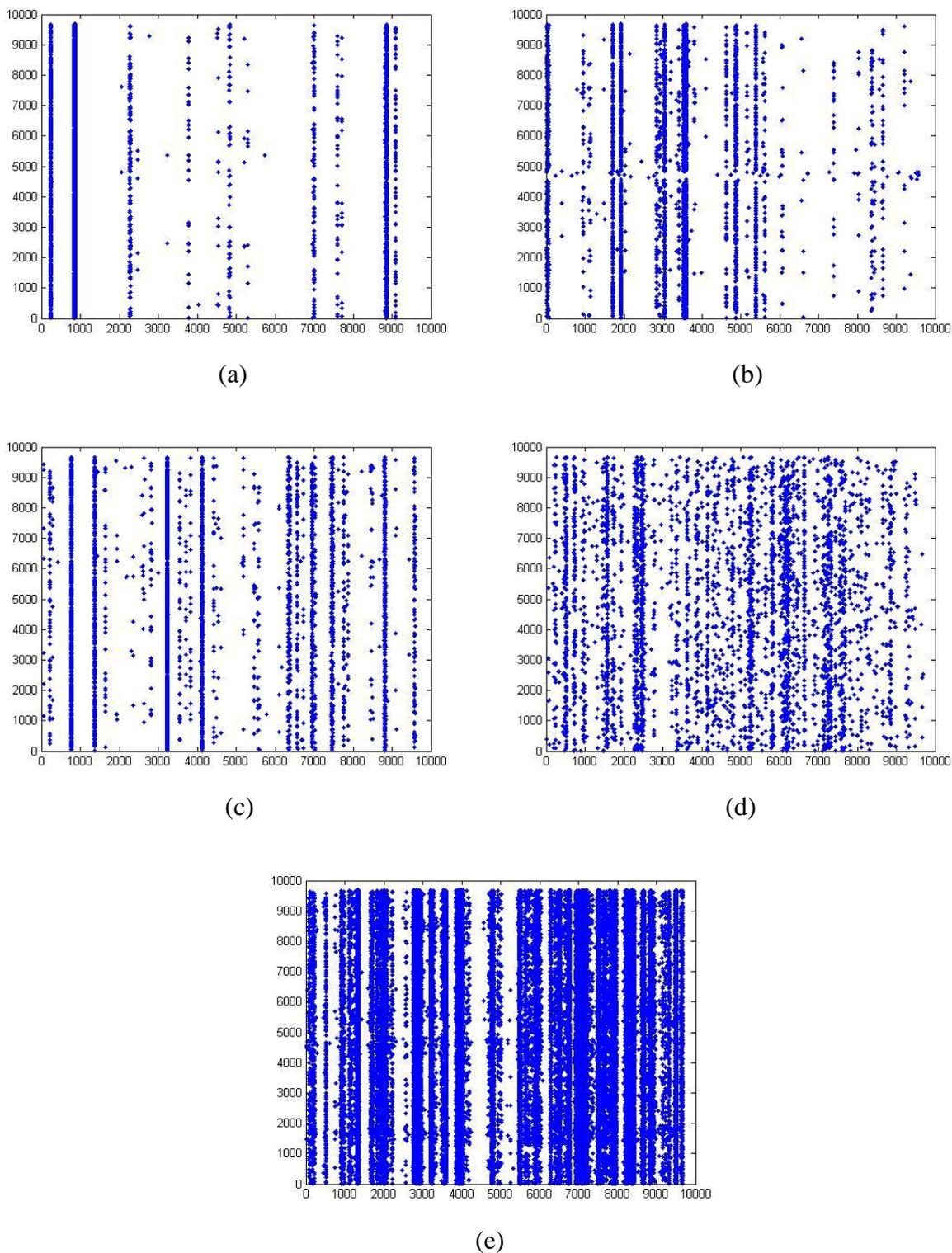


Figure III.8. CRP des composantes hautes fréquences (D1) en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 3 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff.

La figure III.8 est celle des CRP du signal du courant de fuite et de celui de la charge électrique pour différents paliers de tension appliquée.

Dans la figure III.8.a, où la tension est égale à $5kV_{eff}$, montre une structure avec quelques points et de rares lignes verticales. Cela est en accord avec ce qui se passe physiquement, de rares décharges partielles de très faibles intensités et quelque décharges superficielles leur donnant naissance dans les quelques zones propres. Tout cela reste très loin du contournement et de la formation de l'arc électrique.

Pour la figure III.8.b où la tension est de $10kV_{eff}$, l'évolution de la structure est croissante, soit pour le nombre de points ou celui des lignes. Une telle structure traduit l'augmentation simultanée du nombre de décharges superficielles et partielles. La formation de l'arc électrique n'est plus loin.

Dans la figure III.8.c, de tension appliquée égale à $15kV_{eff}$, l'évolution est toujours croissante, mais elle est plus importante pour les points que pour les lignes verticales. Physiquement, les décharges superficielles s'intensifient et augmentent en nombre, quant aux décharges partielles, elles sont restreintes sur quelques bandes propres. Elles varient plus en intensité qu'elles n'augmentent en nombre, le contournement est proche.

La figure III.8.d, (tension $20kV_{eff}$), a une structure unique caractérisée par un nombre très important de points, mais dépourvue de lignes verticales. Aucune structure ne pourra présenter ce qui se passe réellement mieux que celle-ci, vue qu'il n'y a que des décharges superficielles très intenses et très nombreuses, cela est due au fort niveau de pollution qui laisse plus de place aux décharges superficielles.

Pour finir la figure III.8.e, de niveau de tension à $25kV_{eff}$, a une structure définie par des bandes pleines avec quelques points isolés. Ceci signifie la formation de l'arc, qui, pour cette pollution de classe 3 se forme sans formation préalable des décharges partielles. Le contournement se fait directement.

III.1.3. JRP des composantes hautes fréquences des signaux du courant de fuite et de la charge électrique

III.1.3.1. Cas d'une pollution de classe 1

On s'intéressera à un signal du courant de fuite et de la charge sous une pollution non uniforme d'une conductivité de $3,5mS/cm$.

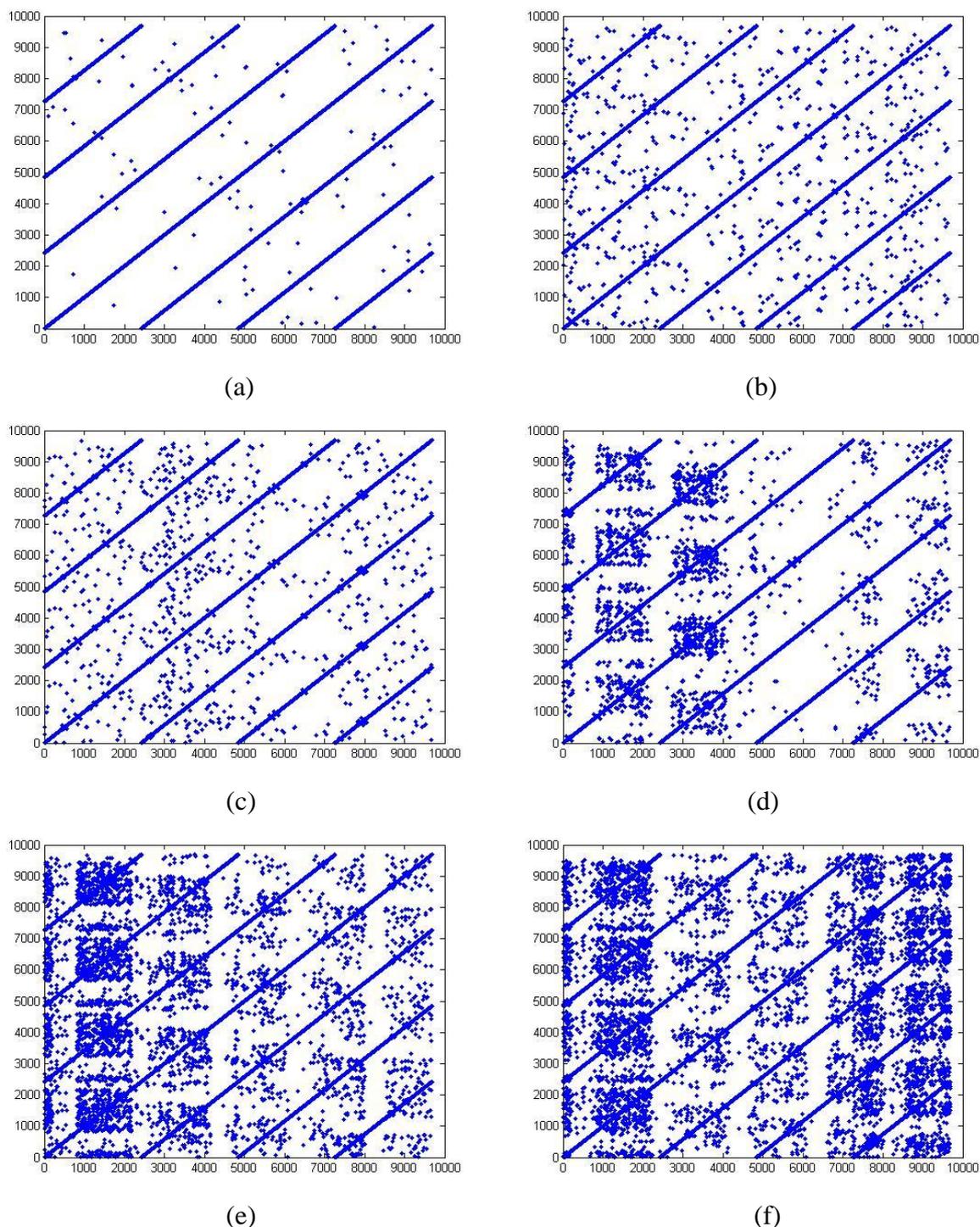


Figure III.3. JRP de la composante haute fréquence (D1) en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 1 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff, (f) 30kVeff.

D'après les figures III.3 et suivant l'analyse visuelle, nous interprétons de la façon la plus plausible les résultats que nous avons eus de la JRP du détail D1 du courant de fuite et de la charge. Toutefois, vue que la nature des deux signaux diffère, la réaction qu'à la classe de pollution sur la charge électrique diffère de celle sur le courant de fuite. Donc on aura une

analyse n'étant utilisable que pour la classe 1. Cela dit, vu que pour une pollution de classe 1 le signal de la charge reste presque inchangé, on aura une interprétation identique à celle de la RP du courant de fuite de cette même classe.

Pour toutes les figures III.3, nous avons des lignes diagonales parallèles à la LOI, ce qui nous indique une évolution périodique similaire entre les deux signaux ainsi qu'une relation entre eux liée par la classe de pollution.

La figure III.3.a, où la tension appliquée est de $5kV_{eff}$, a une structure caractérisée par un petit nombre de points éparpillés. Une telle structure schématise le nombre très petits voir rares des décharges de surface apparaissant lors des essais.

Toutefois, ces décharges étant faibles et localisées autour des zones propres, la probabilité pour que l'arc électrique se produise reste infime. Cela nous amène à élever les niveaux de tension afin de pouvoir remarquer les paramètres décrivant cet arc dans la JRP.

La Figure III.3.b, où la tension appliquée est de $10kV_{eff}$, comporte une structure très semblable à celle de la figure III.3.a, avec une légère augmentation du nombre de points vue l'élévation de la tension appliquée. Mais ceci reste insuffisant pour produire le contournement.

Pour la figure III.3.c de tension appliquée égale à $15kV_{eff}$, la structure reste assez éparpillée même si le nombre de points a significativement augmenté et s'est intensifié. Réellement, les décharges superficielles se sont elles aussi intensifiées pour ce niveau de tension, mais tout de même sans pouvoir donner naissance à l'arc électrique.

La figure III.3.d, de tension appliquée de $20kV_{eff}$, présente une nouvelle structure bien plus ordonnée que les précédentes. Les points sont plus denses, cela dit on remarque l'apparition de bandes blanches grossières. Celles-ci caractérisent l'arrivée d'un état de transition certain. Physiquement, les décharges superficielles sont plus intenses et elles sont de plus en plus intermittentes. La surface c'est saturée ce qui laisse prévoir une apparition imminente de l'arc électrique.

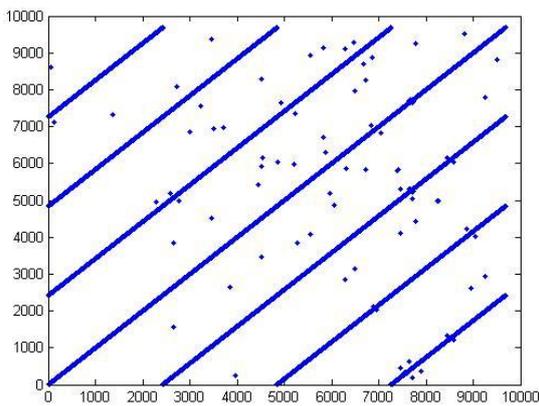
La figure III.3.e, de tension appliquée de $25kV_{eff}$, possède une structure moins grossière que la précédente. Le nombre des points augmente, et ces derniers se regroupent dans des structures

denses. En réalité de petits arcs électriques apparaissent dans les zones propres. Celles-ci remplacent les décharges superficielles.

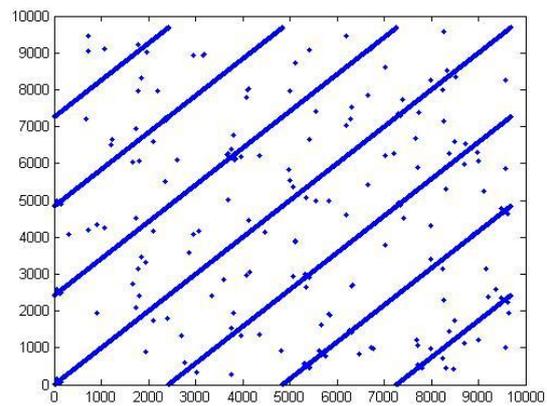
Finalement, pour la figure III.3.f, de tension égale à 30kV_{eff}, la structure est plus affinée possédant une très grande densité de point. Ceux-ci sont séparés par des bandes blanches. Cette structure définit ce qui se passe sur la surface du modèle de l'isolateur, des décharges de fortes intensités se produisent. Les bandes blanches soulignent l'imminence du claquage, et la formation de l'arc électrique produisant le contournement.

III.1.3.2. Cas d'une pollution de classe 2

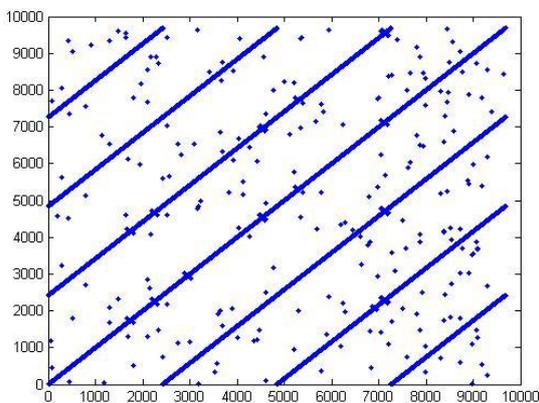
On s'intéressera à un signal du courant de fuite et de la tension sous une pollution non uniforme d'une conductivité de 6mS/cm.



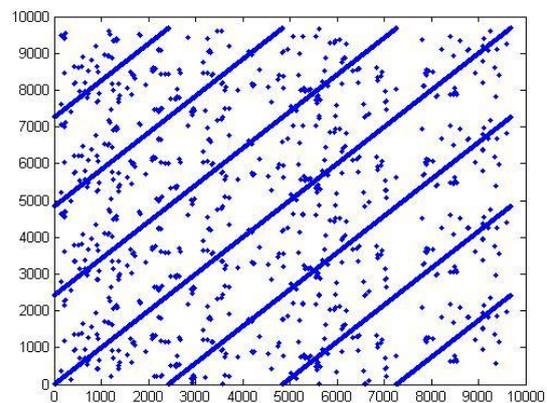
(a)



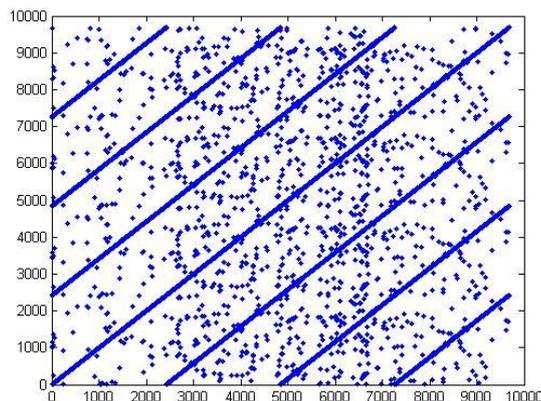
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure III.6. JRP des composantes hautes fréquences (D1) en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 2 : (a) 10kV_{eff}, (b) 15kV_{eff}, (c) 20kV_{eff}, (d) 25kV_{eff}, (e) 30kV_{eff}.

La figure en III.6 représente la JRP des premiers détails du courant de fuite et de la charge électrique pour une pollution de classe 2. Vu que cette classe représente une pollution moyenne ayant une répercussion visible sur la charge électrique, une interprétation différente est alors de mise. Les lignes diagonales parallèles à la LOI sont toujours présentes donc nos deux signaux évoluent toujours périodiquement ensemble et pour de petites tensions cette évolution est chaotique.

La figure III.6.a de tension appliquée 10kV_{eff}, est caractérisée par un petit nombre de points tous éparpillés. Une absence de points dans le coin haut gauche et celui bas droit indique la non-stationnarité du système donc un décalage entre les deux signaux. Cette interprétation reflète très bien ce qui se passe physiquement. C'est-à-dire la présence de rares décharges surfaciques non stationnaires.

Pour la figure III.6.b de tension égale à 15kV_{eff}, la structure ne change pas mis à part l'augmentation du nombre de points. Cela reflète le nombre croissant de décharges qui commencent peu à peu à devenir stationnaires, le contournement n'est toujours pas envisageable.

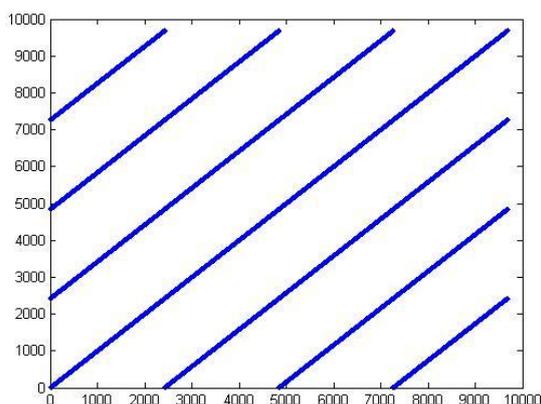
La figure III.6.c de tension appliquée égale à 20kV_{eff}, présente une structure où le nombre de points a significativement augmenté et sont devenus plus denses, ainsi que l'apparition des bandes blanches. Réellement, ceci traduit l'augmentation ainsi que l'intensification des décharges surfaciques. Cependant, l'état de transition commence à se rapprocher, donc l'arc électrique n'est plus très loin.

Concernant la figure III.6.d, de tension égale à $25kV_{eff}$, la structure diffère des précédentes. Les points sont plus denses dans des zones délimitées par les bandes blanches qui commencent à mieux se dessiner. On note aussi l'apparition de petites lignes diagonales orthogonales à la LOI qui indique qu'il ya une petite évolution similaire à d'autres périodes mais en temps inverse. Réellement, les décharges superficielles sont plus intenses et la surface est saturée, ce qui prévoit un contournement imminent vu l'état de transition certain.

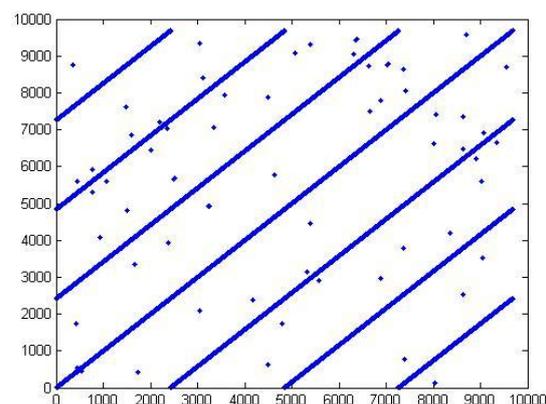
Finalement, à une tension de $30kV_{eff}$ (figure III.6.e), la structure est totalement différente. Elle est caractérisée par une grande densité de points en symétrie par rapport aux diagonales. Cela contraste de plus en plus les bandes blanches, qui s'associent physiquement à de fortes décharges partielles sur les zones propres en vue d'un état de transition certain. Ces décharges se relient entre elles formant un arc électrique qui produit le contournement.

III.1.3.3. Cas d'une pollution de classe 3

On s'intéressera à un signal du courant de fuite et de la charge électrique sous une pollution non uniforme d'une conductivité de $20mS/cm$.



(a)



(b)

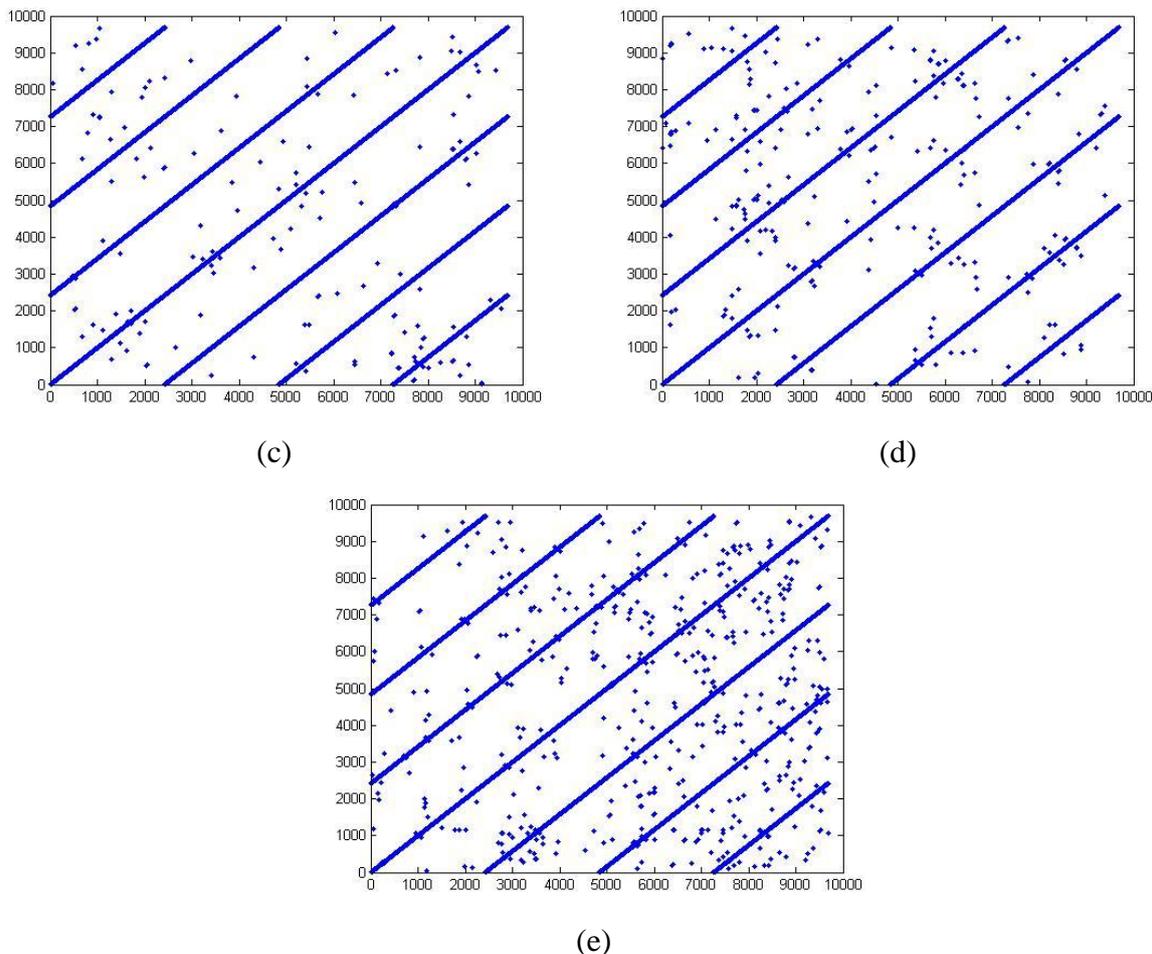


Figure III.9. JRP des composantes hautes fréquences (D1) en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 3 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff.

Dans les figures III.9, nous représentons de la JRP des premiers détails du courant de fuite et de la charge électrique pour une pollution de classe 3. L'interprétation diffère de celle des autres classes mais pas totalement, comme cité précédemment, la classe de pollution a une répercussion visible sur la charge, tout de même cette influence est quasi la même pour les classes de pollution 2 et 3, pour cela cette interprétation pourra sembler la même.

Les lignes diagonales parallèles à la LOI sont toujours présentes, donc nos deux signaux évoluent toujours périodiquement. Cela a lieu selon un schéma chaotique pour de petites tensions et plus ou moins selon un schéma déterministe pour les tensions un peu élevées.

La figure III.9.a, de tension appliquée de 5kVeff, représente une structure unique dépourvue des points mis à part pour les lignes diagonales parallèles à la LOI. Ceci est conforme

à l'expérimentation pour ce qui est de la quasi absence de décharges. L'arc n'est pas à être cité vu que même les décharges n'ont presque pas eu lieu.

Pour la tension de $10kV_{eff}$, la figure III.9.b a une structure caractérisée par un petit nombre de points éparpillés. Les coins haut gauche et bas droit sont dépourvus de points, cela montre la non-stationnarité du système ainsi que le décalage entre les deux signaux. Seuls les décharges surfaciques existent mais sont toujours rares et non stationnaires et un contournement n'est pas prêt de se produire avec une si faible tension.

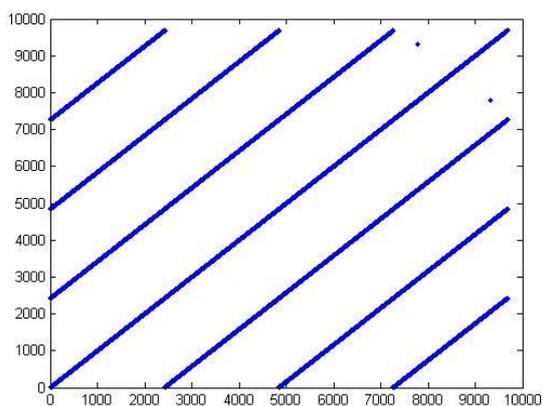
La figure III.9.c, de tension de $15kV_{eff}$, a une structure inchangée mis à part l'augmentation du nombre de points éparpillés. Cela est dû au nombre croissant de décharges qui commencent à paraître de plus en plus stationnaires. Au delà de cette tension, le système évolue vers un schéma déterministe.

Concernant la figure III.9.d de tension appliquée $20kV_{eff}$, le nombre de points augmente et deviennent plus denses. Nous remarquons l'apparition des premières bandes blanches. Cette structure traduit l'augmentation ainsi que l'intensification des décharges surfaciques, vu le rapprochement de l'état de transition, l'arc électrique commence à se faire ressentir.

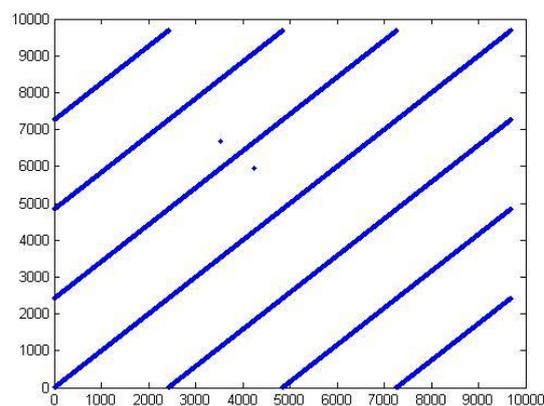
Pour la figure III.9.e, la tension est à $25kV_{eff}$, une structure qu'on peu caractériser de finale apparait. Les points sont plus denses dans des zones délimitées par les bandes blanches plus apparentes. Cela revient au fait que les décharges superficielles s'intensifient dans des surfaces maintenant saturées. Le contournement peut se produire à tout moment et l'arc électrique se formera pour n'importe quelle tension supérieure à celle-ci.

III.2. Les applications de la JRP sur les composantes hautes fréquences des signaux de courant de fuite et de la tension appliquée

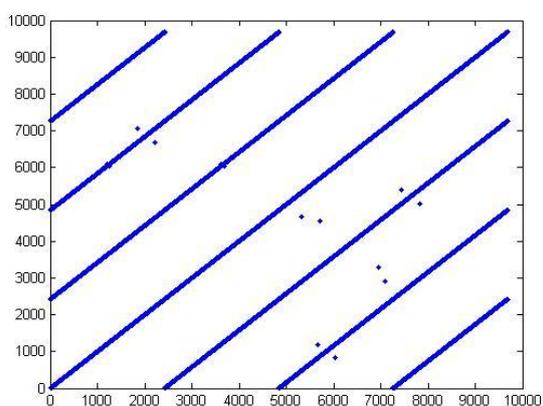
La figure III.10 représente la JRP des premiers détails du signal de courant de fuite et de la tension appliquée pour une pollution de classe 1.



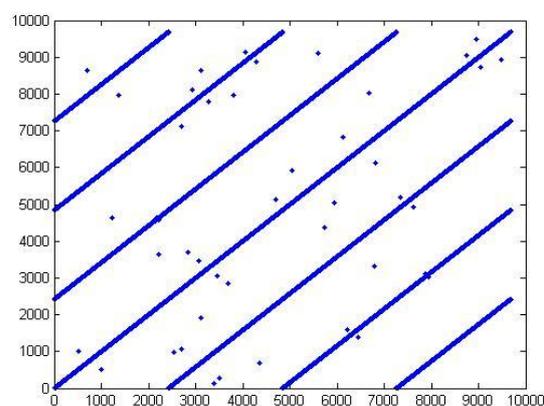
(a)



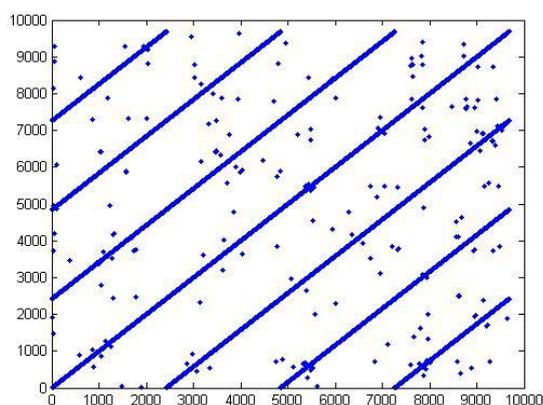
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure III.10. JRP des composantes hautes fréquences (D1) du signal de courant de fuite et de la tension appliquée pour une pollution de classe 1 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff.

On commence, par les lignes diagonales parallèle à la LOI qui est loin des points isolés. Cette structure décrit l'évolution périodique déterministe.

La figure III.10.a, de tension $5kV_{eff}$, ainsi que la figure III.10.b, de tension $10kV_{eff}$, ont la même structure dépourvue de points récurrents mis à part pour les diagonales. En réalité, ce qui caractérise ces niveaux de tension est la rareté des décharges superficielles qui rend la présence des décharges partielles impossible. Cela nous a poussés à associer les points récurrents directement aux décharges partielles.

Dans la figure III.10.c, de tension égale à $15kV_{eff}$, on remarque l'apparition des premiers points isolés. Réellement, ceci est dû à l'augmentation des décharges superficielles et de leur intensification. Cela n'est pas encore suffisant pour générer l'arc électrique.

La figure III.10.d, à une tension de $20kV_{eff}$, est caractérisée par une augmentation de points plus visibles. Ces derniers se concentrent autour des diagonales changeant son évolution de déterministe à chaotique. Physiquement, on remarque l'augmentation des décharges superficielles, qui génèrent de plus en plus de décharges partielles. Celles-ci ne semblent être régies par aucune loi. Ceci confirme l'évolution chaotique.

Pour finir, la figure III.10.e, de tension $25kV_{eff}$, représente une structure différente. Le nombre de points a significativement augmenté, sans qu'ils ne deviennent plus denses. Cela explique les décharges partielles présentes sur les bandes propres et qui commencent à former l'arc électrique. Le contournement apparaît très brièvement après leur apparition.

Cette interprétation ne sera pas valable pour d'autres classes de pollution. Les décharges superficielles pour les classes 2 et 3 sont si intenses qu'elles ont presque le même comportement que celui des décharges partielles, donc l'interprétation sera erronée et le diagnostic du degré de pollution sera faux.

L'utilisation de la JRP sur les composantes hautes fréquences des signaux du courant de fuite et de celui de la tension appliquée pour le diagnostic de la sévérité pollution, est possible dans les cas où d'autres paramètres supplémentaires sont pris en compte. Parmi ces paramètres,

on peut citer les conditions climatiques et géographiques dans lesquelles se trouve l'isolateur à surveiller.

III.3. Les applications de la JRP sur les composantes hautes fréquences des signaux de la charge électrique et de la tension appliquée

III.3.1. Cas d'une pollution de classe 1

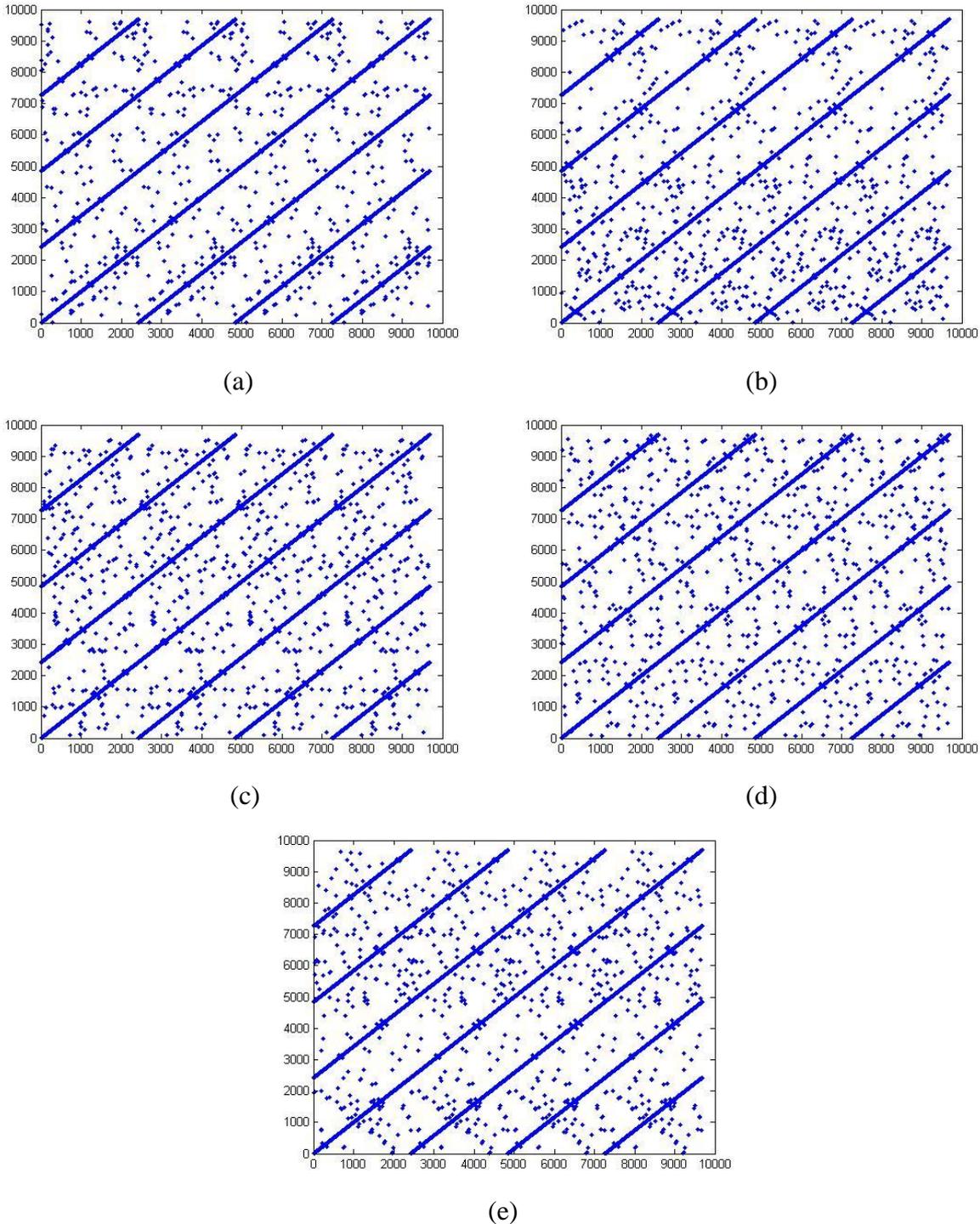


Figure III.11. JRP des composantes hautes fréquences (D1) du signal de la charge électrique et de la tension appliquée pour une pollution de classe 1 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff.

III.3.2. Cas d'une pollution de classe 2

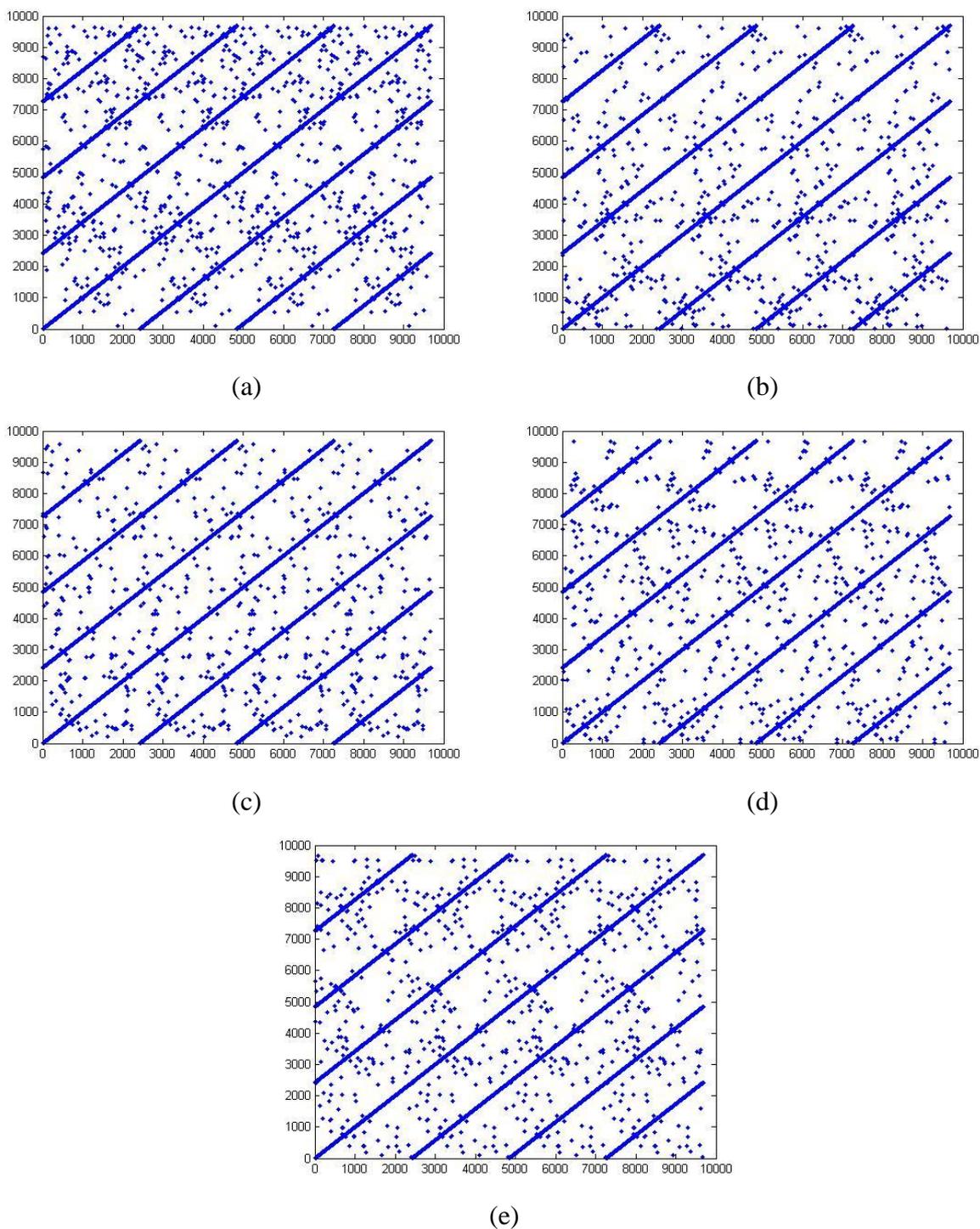


Figure III.12. JRP des composantes hautes fréquences (D1) du signal de la charge électrique et de la tension appliquée pour une pollution de classe 2 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff.

III.3.3. Cas d'une pollution de classe 3

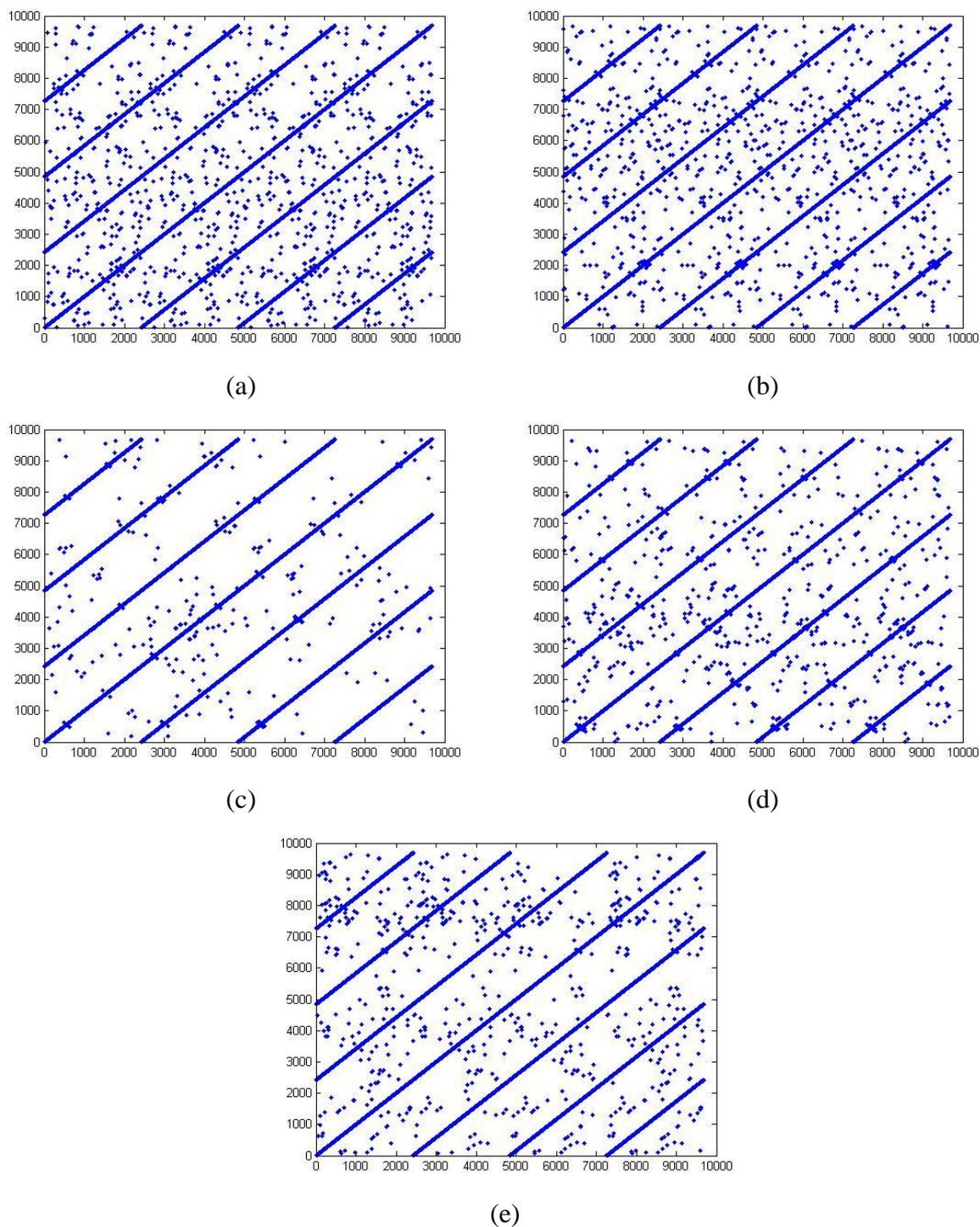


Figure III.13. JRP des composantes hautes fréquences (D1) du signal de la charge électrique et de la tension appliquée pour une pollution de classe 3 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff.

Les interprétations des figures III.11, III.12 et III.13 qui concernent les JRP de la tension et de la charge sont les mêmes, donc on les a rassemblées toutes ici.

Il est bien évident que les JRP du signal de tension appliquée et de la charge électrique pour les différents niveaux de tension ont la même structure. Le même nombre de points isolés et des lignes diagonales parallèles à la LOI. Ces dernières décrivent une évolution chaotique semblable à d'autres périodes entre les deux signaux.

La JRP étant une étude comparative, ces structures décrivent les différences entre deux signaux d'un point de vue temporelle. Ces structures restent inchangées car une relation directe existe entre la tension appliquée et la charge électrique. Ceux-ci évoluent sans déphasage avec un coefficient, suivant la relation : $Q = \frac{1}{2}CV^2$. Ce qui rend la JRP de la charge et de la tension inutilisable pour les diagnostics des décharges et du contournement, et cela pour les trois classes de pollution.

Conclusion

D'après ce chapitre, nous sommes arrivés à une conclusion resumée sur ces quelques points :

- La RP du courant de fuite donne de très bons résultats, ce qui nous permet de l'utiliser comme base pour notre étude comparative.
- La JRP est préférable à la CRP pour ce qui est de l'étude comparative entre deux signaux, ce qui nous a incité à la prendre comme méthode principale pour cette étude.
- l'étude comparative entre les différents signaux nous a permis de définir la combinaison optimale qui nous permet de déterminer le degré de pollution présent sur la surface de l'isolateur.

Chapitre IV :

**Application de l'analyse
quantitative de récurrence
(RQA) pour l'estimation du
degré de sévérité de pollution**

Introduction

Dans ce chapitre on va essayer de procéder à une approche quantitative de la RP vue qu'elle, étant basé sur l'analyse visuelle, donc une analyse qualitative, peu souvent s'avère peut précise. Pour cela on a utilisé la RQA afin de parvenir à des résultats complémentaires ou si possible pouvant remplacer notre analyse visuelle RP et JRP. Comme on ne peut faire aucune étude sans auparavant connaître sa théorie, c'est par cette dite théorie bien que brève qu'en a entamé notre chapitre, pour après la suivre de l'analyse RQA du signal de courant de fuite et celui de la charge électrique et finir avec une petite discussion concernant cette analyse.

IV.1. Analyse quantitative du diagramme de récurrence (RQA)

En analogie à la RP et afin de fournir une analyse quantitative complémentaire, J.P. Zbilut et C.L. Jr. Webber [56] ont développé un outil de quantification des structures de la RP, dit « analyse quantitative de récurrence » (Recurrence Quantification Analysis, (RQA)).

Ce puissant outil définit la complexité des mesures de la RP d'après plusieurs paramètres tels que la densité de points récurrents ou encore les structures des lignes présentes dans la RP, ce qui permet de détecter plus précisément les états de transitions, eux même présents dans les points de bifurcation trouvés dans la RQA. Donc nous diront que la RQA est l'approche quantitative qui manque à la RP, qui complétera nos analyses des courants de fuites et autres signaux liés au phénomène de décharges et de contournement [48].

IV.1.2. Les mesures de la RQA

Pouvant être divisé en trois types, les mesures de la RQA sont soit basées sur la densité, les lignes diagonales ou sur les lignes verticales (similaires aux horizontales vu la symétrie par rapport à la diagonale principale (LOI)) [28].

IV.1.2.1. Basées sur la densité

- **Taux de récurrence (RR) :** Le RR (récurrence rate) comptabilise le nombre de points noirs dans une RP. Statistiquement il correspond à la probabilité de répétition d'un état, utilisable pour la détection des changements dans la dynamique du système. Ce paramètre est défini par :

$$RR(\varepsilon) = \frac{1}{N^2}, \quad (IV.1)$$

Cela dit pour le taux de récurrence de la JRP de n systemes:

$$JC(\varepsilon^{(1)}, \dots, \varepsilon^{(n)}) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \prod_{k=1}^n R_{i,j}^{\vec{x}^{(k)}}(\varepsilon^{(k)}), \quad (IV.2)$$

IV.1.2.2. Basées sur les lignes diagonales

Ainsi, on ne pourra se dérober à l'introduction de l'histogramme $P(\varepsilon, l)$, qui représente le nombre totales de lignes diagonales de longueur l dans une RP de seuil fixé ε , par :

$$P(\varepsilon, l) = \sum_{i,j=1}^N \left(1 - R_{i-1,j-1}(\varepsilon)\right) \left(1 - R_{i+1,j+1}(\varepsilon)\right), \quad (IV.3)$$

Par analogie, et afin d'éviter les répétitions non nécessaires le nombre de lignes verticales sera le même que celui de lignes diagonales. Mis à part le fait de remplacé le l par un v , représentant la longueur des lignes verticales, aussi on ne citera plus ε pour simplifier et on aura $P(l) = P(\varepsilon, l)$. Même si ces mesures sont de deux types, le nombre de paramètres reste important pour cela des paramètres dit principaux sont utilisés étant donnée qu'ils fournissent le plus d'informations.

On citera:

- **Déterminisme (DET):** Ce paramètre concerne la probabilité de prédiction du processus, concrètement c'est le rapport entre le nombre de points récurrents formant les diagonales (au moins de longueur L_{min}) et le nombre total de tous les points récurrents. Les différents types de signaux ont chacun une structure différente, tel que les signaux non corrélés, ou faiblement corrélés, apparaissent sous formes de courtes diagonales sur les RP. Les signaux déterministes impliquent des diagonales plus longues, ainsi que des points récurrents isolées.

$$DET = \frac{\sum_{l=L_{min}}^N lP(l)}{\sum_{i,j}^N R_{i,j}^m}, \quad (IV.4)$$

- **Longueur moyenne des lignes diagonales (L) :** L définit le temps moyen pendant lequel deux segments de trajectoire sont proches l'un de l'autre, et peut être interprétée comme la moyenne du temps de prédiction.

$$L = \frac{\sum_{l=l_{min}}^N P(l)}{\sum_{l=l_{min}}^N P(l)}, \quad (IV. 5)$$

- **Longueur maximale des structures diagonales :** ou leur inverse, la *divergence*,

$$L_{max} = \max(\{l_i; i = 1 \dots N_l\}), \quad (IV. 6)$$

Ou

$$DIV = \frac{1}{L_{max}}, \quad (IV. 7)$$

- **Entropie (ENTR) :** L'entropie ou entropie de Shannon concernant la distribution en fréquences des lignes diagonales de la RP : elle reflète la complexité de la structure de la RP par rapport aux lignes diagonales. La valeur ENTR est directement liée à la complexité et à la corrélation des signaux.

$$ENTR = -\sum_{l=l_{min}}^N p(l) \ln p(l), \quad (IV. 8)$$

Avec

$$p(l) = \frac{P(l)}{\sum_{l=l_{min}}^N P(l)}, \quad (IV. 9)$$

- **Entropie de temps Récurrent (RTE) :** Le RTE (Recurrence Time Entropy) indique la périodicité ou la répétitivité d'un signal. Il s'applique aux systèmes dynamiques ainsi qu'aux processus stochastiques. Son expression est donnée par :

$$RTE = -(\ln T_{max})^{-1} \sum_{t=1}^{T_{max}} p(t) \cdot \ln p(t), \quad (IV. 10)$$

Où T_{max} représente la plus grande période du signal. On trouve l'intérêt de la RTE dans la détection des changements même subtils dans les dynamiques des systèmes stochastiques.

- **Tendance** : (Trend) est un coefficient linéaire renseigné sur la densité de point récurrent RR_τ des lignes diagonales parallèles à la LOI, comme une fonction de la distance temporelle entre ces diagonales et la LOI.

$$TREND = \frac{\sum_{\tau=1}^{\tilde{N}} (\tau - \tilde{N}/2) (RR_\tau - \langle RR_\tau \rangle)}{\sum_{\tau=1}^{\tilde{N}} (\tau - \tilde{N}/2)^2}, \quad (IV.11)$$

Ou RR_τ est le taux de récurrence τ pour les lignes diagonales distante d'une distance τ de la LOI donnée par :

$$RR_\tau = \frac{1}{N - \tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} R_{i,i+\tau} = \frac{1}{N - \tau} \sum_{l=1}^{N-\tau} lP_\tau(l), \quad (IV.12)$$

Cette mesure donne des informations concernant la non-stationnarité dans le processus, et surtout si une dérive est présente dans la trajectoire analysée.

- **Rapport (Ratio)** : Tout comme son nom l'indique est le rapport entre le déterminisme DET et le taux de récurrence RR [60]. Il peut être calculé suivant $P(l)$ le nombre de lignes diagonales de longueur l comme suit :

$$RATIO = N^2 \frac{\sum_{l=l_{min}}^N lP(l)}{(\sum_{l=1}^N lP(l))^2}, \quad (IV.13)$$

IV.1.2.3. Basées sur les lignes verticales

- **Laminarité (LAM)** : Ce paramètres fut introduit par Norbert Marwan pour la première fois dans le cadre de sa thèse qui consistait à trouver de nouvelles applications à la RP et à la RQA, cela dit, il représente la quantité de points récurrents obtenus à partir des lignes verticales, il est donné par l'expression suivante :

$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{min}}^N vP(v)}{\sum_{v=1}^N vP(v)}, \quad (IV.14)$$

- **Temps d'emprisonnement (TT)** : (Trapping Time) il estime le temps moyen où le système demeurera à un état spécifique ou combien de temps l'état sera emprisonné.

$$TT = \frac{\sum_{v=v_{min}}^N vP(v)}{\sum_{v=v_{min}}^N P(v)}, \quad (IV. 15)$$

- **Longueur maximale des structures verticales** : en analogie à l'utilisation la *Longueur maximale* des structures diagonales, la RQA utilise aussi la V_{max} .

$$V_{max} = \max(\{v_i; i = 1 \dots N_v\}), \quad (IV. 16)$$

Les indicateurs précédemment cités informent sur les différents états d'un processus étudié, et sont en réalité fortement inter-corrélés. Les mesures basées sur les lignes verticales sont capables de trouver les transitions chaos-chaos. Ces indicateurs permettent alors, d'étudier l'intermittence, même pour les séries de données courtes et non stationnaires. De plus, les transitions chaos-ordre peuvent être identifiées pour des systèmes dynamiques périodiques dont les mesures sont nulles.

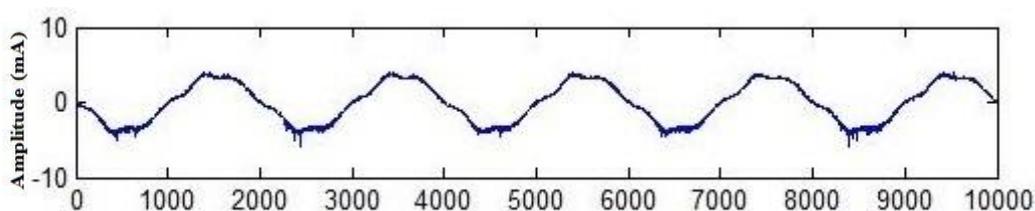
IV.2. Application de l'analyse quantitative de récurrence (RQA) aux signaux de courant de fuite et de la charge électrique

On s'intéressera à appliquer l'analyse quantitative de récurrence directement au signal du courant de fuite correspondant aux différentes classes de pollution, et cela, sous une tension appliquée qui demeurera constante et égale à 20 kV_{eff}. Dans ce paragraphe, on exploitera les signaux des bases de données G1Mod1 et G2Mod1.

IV.2.1. RQA du signal du courant de fuite

IV.2.1.1. Cas d'une pollution de classe 1

Dans ce cas, on s'intéressera à appliquer la RQA à un signal de courant de fuite de pollution de classe 1. La conductivité de la solution polluante est de 3,5 mS/cm.



(a)

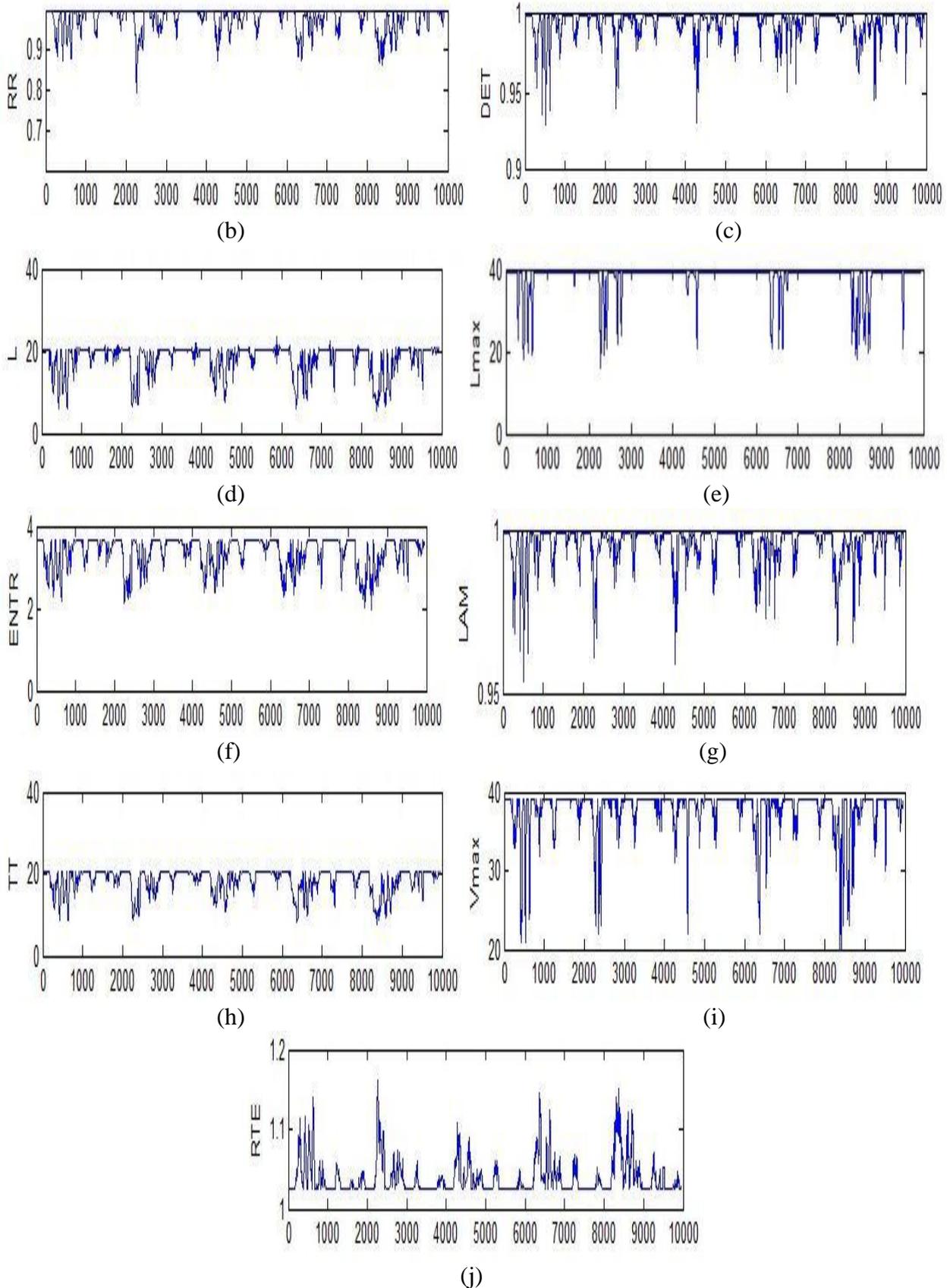


Figure IV.1. Analyse RQA pour une pollution de classe 1 à 20 kVeff (a) indique le signal du courant de fuite, (b) indique RR, (c) indique DET, (d) indique L, (e) indique l_{max} , (f) indique ENTR, (g) indique LAM et (h) indique TT, (i) indique v_{max} (j) indique RTE.

La figure IV.1, présente la RQA donc différentes mesures tirées de la RP du signal du courant de fuite. Celles-ci caractérisées par des pics, donc c'est sur ces pics qu'on va se baser notre interprétation. La première figure IV.1.a, représente le signal du courant de fuite.

La figure IV.1.b, représente l'évolution du paramètre RR, celui-ci révèle la nature de la RP. Ce paramètre étant composé de plusieurs pics étroits d'environ une trentaine d'échantillons. Toutefois, quelques uns sont assez large allons jusqu'à deux cents échantillons. Malgré ces pics, la valeur moyenne de RR égale à 0.9802. Cette structure caractérise l'absence de zone laminaire, ce qui indique un comportement quasi périodique.

Le DET varie faiblement (figure IV.1.c). Celui ci présente des pics très étroits ne dépassant pas une vingtaine d'échantillons. Ces derniers traduisent le comportement non-chaotique du courant de fuite. Toutes les valeurs sont supérieures à 0.9294. La valeur moyenne est égale à 0.9941. Cette évolution reflète la forte présence des structures déterministes.

Exprimant la durée moyenne de la similarité dans la dynamique du système, le paramètre L, est représenté dans la figure IV.1.d, sa valeur moyenne est égale à 18.2612, indiquant qu'il y a de longues lignes diagonales. Avec une valeur L_{max} égale à 39.

La figure IV.1.f, montre l'évolution du paramètre ENTR. Ce dernier varie entre 1.9906 et 3.6376. Il présente une valeur moyenne de 3.3591. Plus les valeurs de ENTR sont grandes plus le courant est complexe.

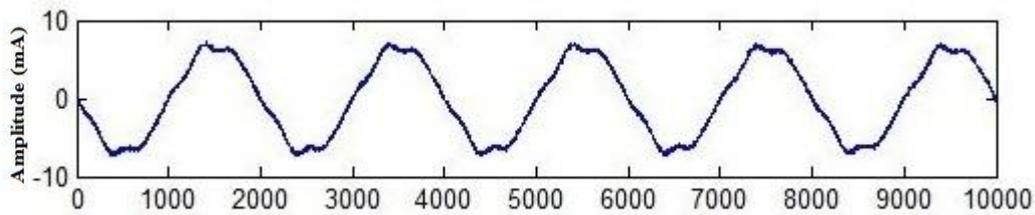
Le LAM présente un nombre de pics élevé (figure IV.1.g). Sauf que ceux-ci sont de très petites amplitudes inférieures à 0.04. Le courant est stationnaire et présente de nombreux états stables.

Le paramètre TT est présenté dans la figure IV.1.h. Ces valeurs oscillent faiblement entre 7.6590 et 20.50, avec une valeur moyenne de 18.4260. Une telle structure oscillante indique un état intermittent, mais vu que celle-ci est peu oscillante donc l'état d'intermittence reste assez loin, ce qui est en accord avec la réalité.

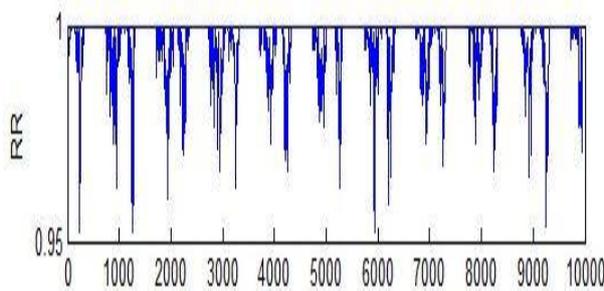
Le paramètre RTE (figure IV.1.j) utilisé afin de déterminer la période d'un signal. Il varie très peu entre 1.025 et 1.16, avec une valeur moyenne égale à 1.0388. La périodicité du courant de fuite pour les faibles pollutions est précisée.

IV.2.1.2. Cas d'une pollution de classe 2

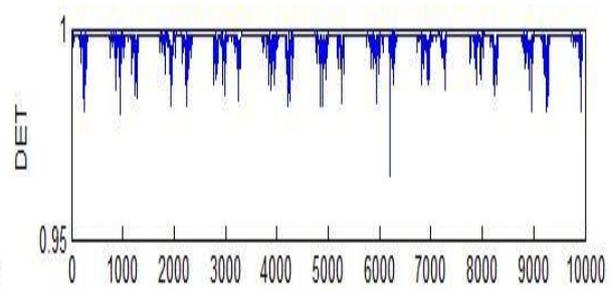
Dans ce cas, on s'intéressera à appliquer la RQA à un signal de courant de fuite de pollution de classe 2. La conductivité de la solution polluante est de 6 mS/cm.



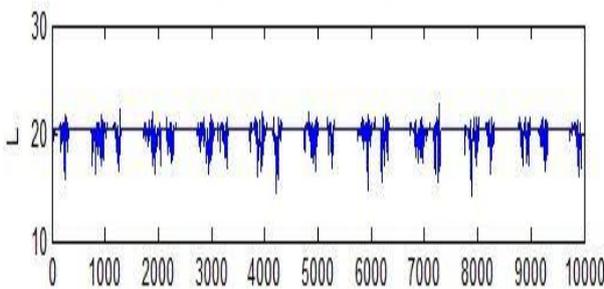
(a)



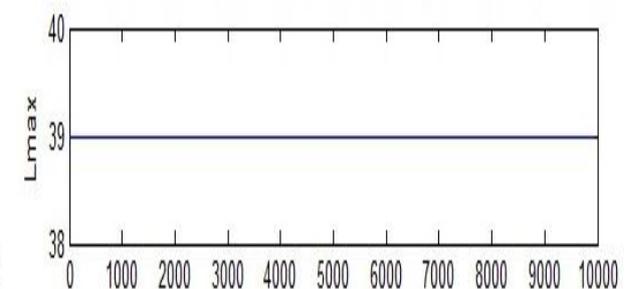
(b)



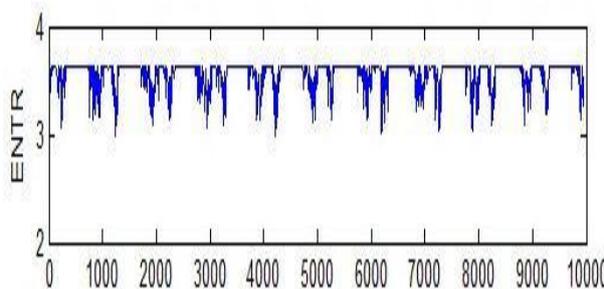
(c)



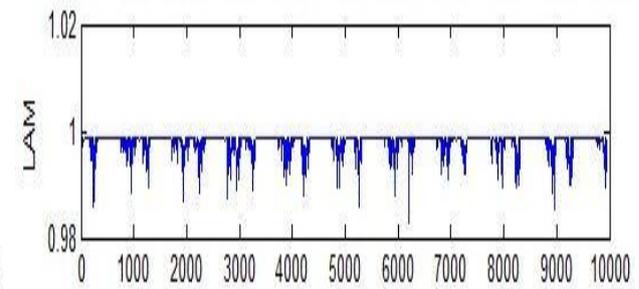
(d)



(e)



(f)



(g)

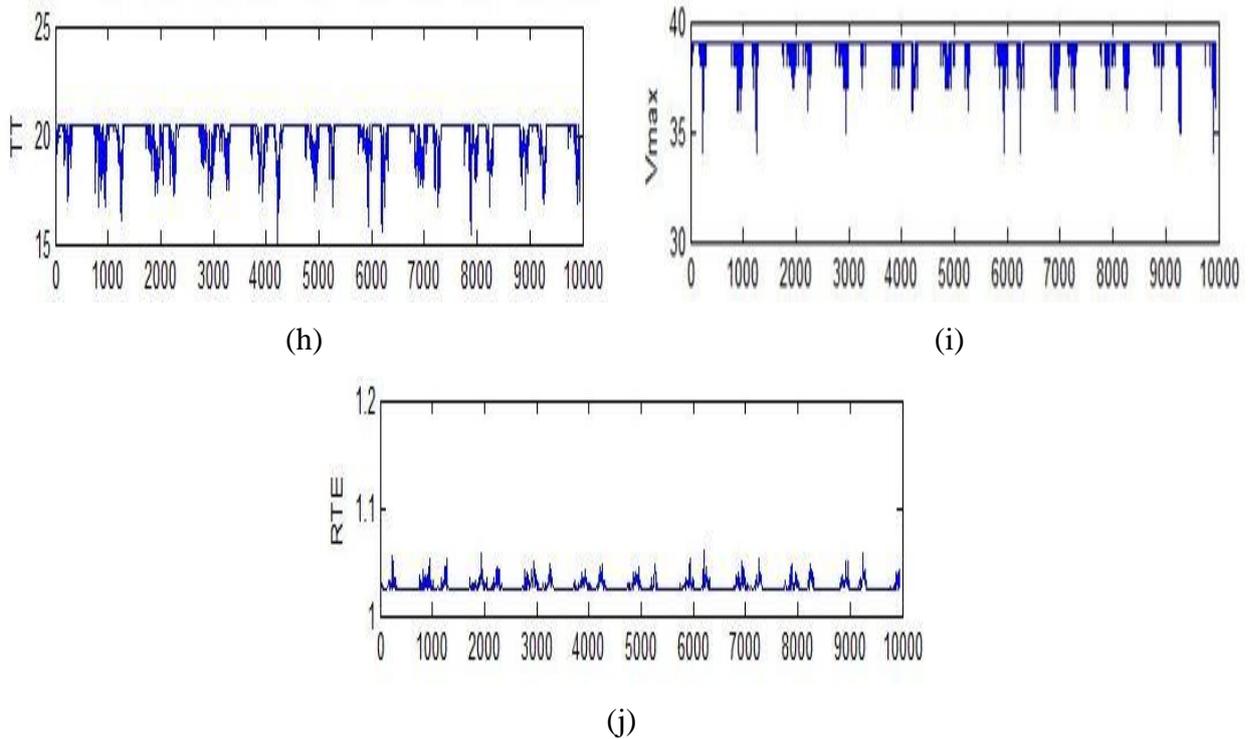


Figure IV.2. Analyse RQA pour une pollution de classe 2 à 20 kVeff

(a) indique le signal du courant de fuite, (b) indique RR, (c) indique DET, (d) indique L, (e) indique l_{max} , (f) indique ENTR, (g) indique LAM et (h) indique TT, (i) indique v_{max} (j) indique RTE.

La figure IV.2 présente la RQA du signal du courant de fuite pour une pollution de classe Le paramètre RR présenté à la figure IV.2.b décrit la structure de la RP comme très peu variable. Cette variation s'interprète par la présence de vingt petits pics, le plus grand vaut 0.0474. Malgré ces pics, la valeur moyenne de RR égale à 0.9962. Cette structure est caractérisée par l'absence des zones laminaires, ce qui indique un comportement périodique.

Le DET de la figure IV.2.c est très peu variant avec des pics plus étroits que ceux de la classe 1. Ces pics traduisent un comportement non-chaotique pour le courant de fuite. Toutes ses valeurs sont supérieures à 0.9653 et de valeur moyenne égale à 0.9976. Une telle évolution caractérise une forte présence des structures déterministes.

D'après la figure IV.2.d, le L a une valeur moyenne égale à 20.1646. Cela signifie que les longues lignes diagonales sont encore plus longues que celles de la classe 1. Toutefois la valeur de L_{max} est constante, toujours égale à 39.

Le paramètre ENTR présenté à la figure IV.2.e, varie entre 2.9772 et 3.6376, donc un même maximum pour les deux classe 1 et 2, avec une valeur moyenne égale à 3.5646, le courant de fuites est plus complexe que pour les faibles pollution.

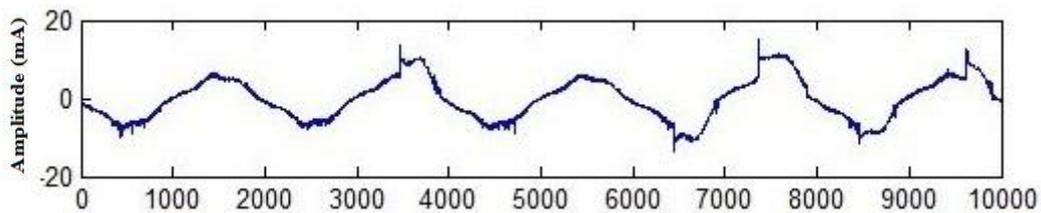
La figure IV.2.g qui présente Le LAM est très peu variable. Les pics sont encore de plus faibles amplitudes que pour la classe 1. Le courant de fuite est plus stationnaire et présente encore plus d'états stables.

Le paramètre TT (figure IV.2.h) présente des valeurs qui oscillent faiblement entre 15.08 et 20.50, donc plus que pour la pollution de classe 1. La valeur moyenne obtenue dans cette class est importante 20.0153 par rapport à celle de la class précédente 18.4260. La plus forte oscillation est remarquable au niveau de nombre des pics, vingt pour la classe 2 et 5 pour la classe 1. Cette structure oscillante indique l'état d'intermittence assez proche, ce qui en accord avec la réalité.

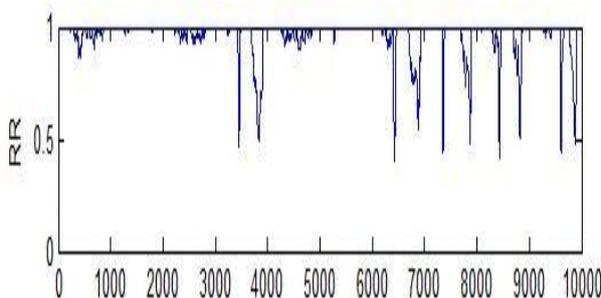
Le RTE varie très peu (figure IV.2.j) entre les deux valeurs 1.025 et 1.0604. Sa valeur moyenne est égale à 1.0275. La périodicité du courant de fuite décroît mais reste importante pour un niveau moyen de pollution.

IV.2.1.3. Cas d'une pollution de classe 3

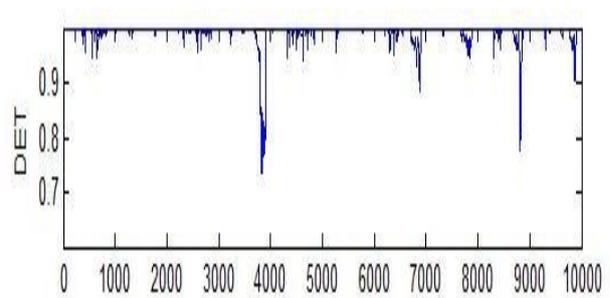
Dans ce cas, on s'intéressera à appliquer la RQA à un signal de courant de fuite de pollution de classe 3. La conductivité de la solution polluante est de 20 mS/cm.



(a)



(b)



(c)

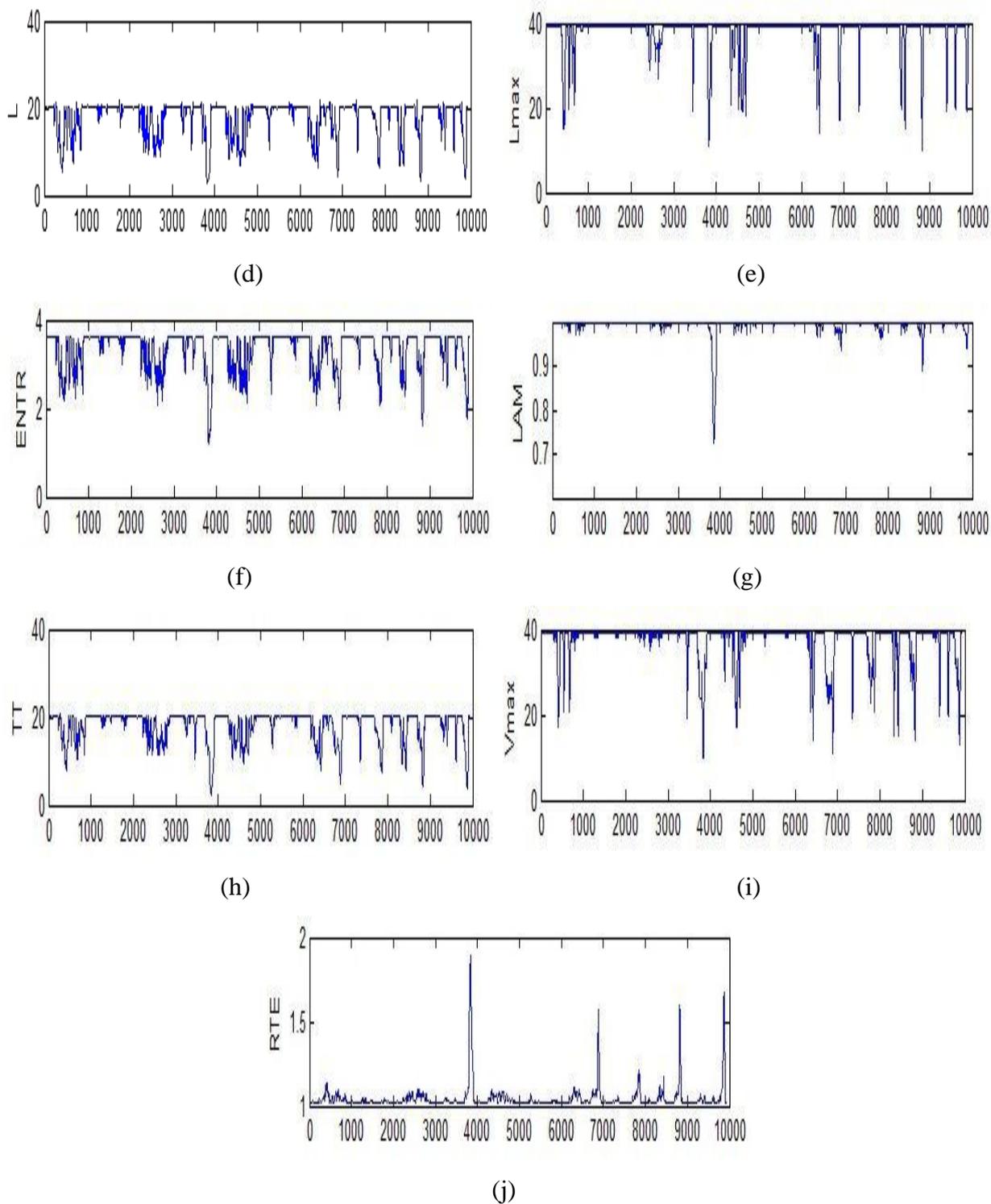


Figure IV.3. Analyse RQA pour une pollution de classe 3 à 20 kVeff

(a) indique le signal du courant de fuite, (b) indique RR, (c) indique DET, (d) indique L, (e) indique l_{max} , (f) indique ENTR, (g) indique LAM et (h) indique TT, (i) indique v_{max} (j) indique RTE.

La figure IV.3 représente la RQA du signal du courant de fuite pour une pollution de classe 3.

Le paramètre RR représenté sur la figure IV.3.b comporte dix pics assez larges s'étalant jusqu'à 500 échantillons. Leur amplitude maximale atteint 0.60. Ces pics indiquent les endroits où la structure comporte des bandes blanche, donc un comportement chaotique du signal. D'où la diminution de la valeur moyenne de RR.

Les variations constatées au niveau du DET de la figure IV.3.c sont plus important. Celles-ci pressent des pics dont l'amplitude est supérieure à celles des deux autres classes. L'apparition de ces pics coïncide avec l'occurrence des bandes blanches.

D'après la figure IV.3.d, nous constatons que la valeur L oscille fortement alors qu'elle été pratiquement stationnaire pour les deux classes de pollution précédentes. La valeur moyenne de ce paramètre décroît jusqu'à atteindre une valeur de 18.1084. Dans ce cas, les lignes diagonales se raccourcissent fortement par rapport aux autres structures. La valeur de L_{max} a aussi changé, et n'est plus stationnaires ayant sa valeur moyenne égale à 37.4945.

Le paramètre ENTR présenté par la figure IV.3.f, varie entre 1.19 et 3.6376. Il a fortement diminué par rapport aux deux classes 1 et 2. Sa valeur moyenne est égale à 3.3562. Ceci traduit une faible complexité du signal du courant de fuite.

La figure IV.3.g montre que le LAM vari d'une manière remarquable. Les pics présents par ce paramètre atteignent des amplitudes importantes (0.2729). Donc le courant de fuites n'est plus stationnaire est ne présente plus que de rares états stables.

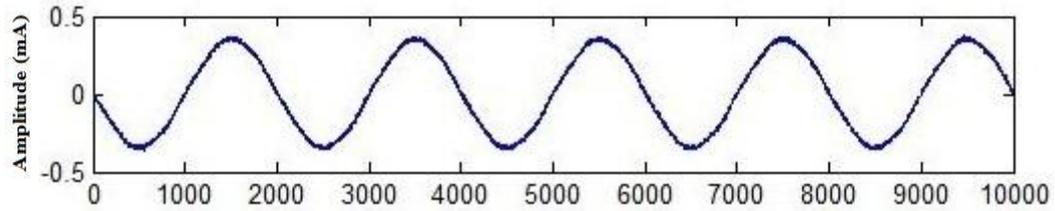
Le paramètre TT présenté à la figure IV.3.h est caractérisé par des valeurs qui oscillent fortement entre 2.5022 et 20.7067. Ces valeurs sont supérieures à celles des deux précédents niveaux de pollution, avec une valeur moyenne égale à 18.2867. Cette structure oscillante indique l'état d'intermittence imminent.

Dans la figure IV.3.j, le RTE varie entre 1.025 et 1.8899. Sa valeur moyenne est égale à 1.0472. Un tel ordre de variation indique l'intense présence de points récurrents donc des décharges électriques.

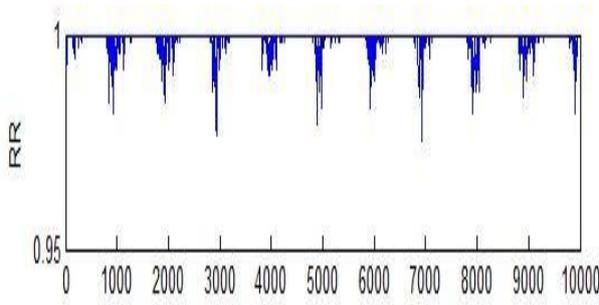
IV.2.2. RQA du signal de la charge électrique

IV.2.2.1. Cas d'une pollution de classe 1

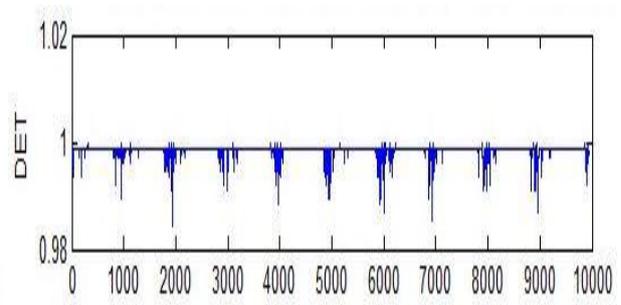
Dans ce cas, on s'intéressera à appliquer la RQA à un signal de la charge électrique de pollution de classe 1. La conductivité de la solution polluante est de 3,5mS/cm.



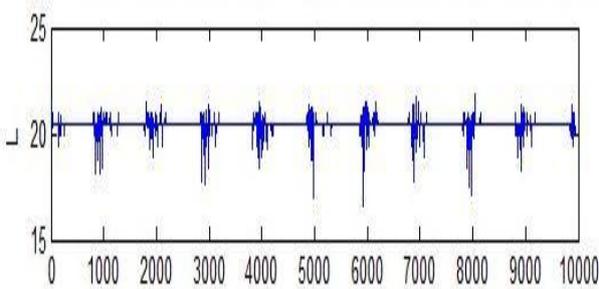
(a)



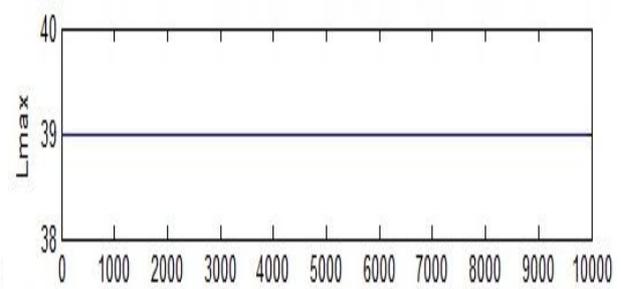
(b)



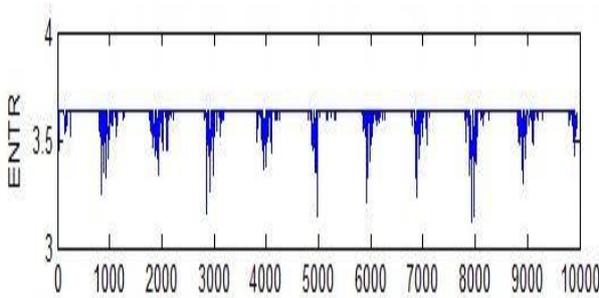
(c)



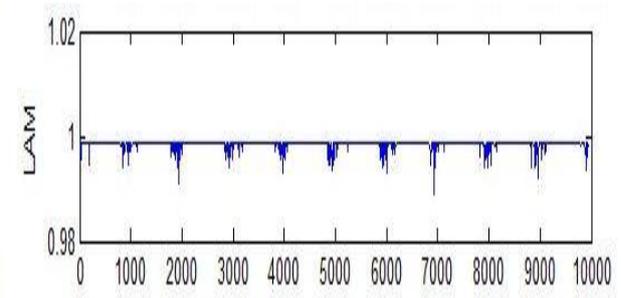
(d)



(e)



(f)



(g)

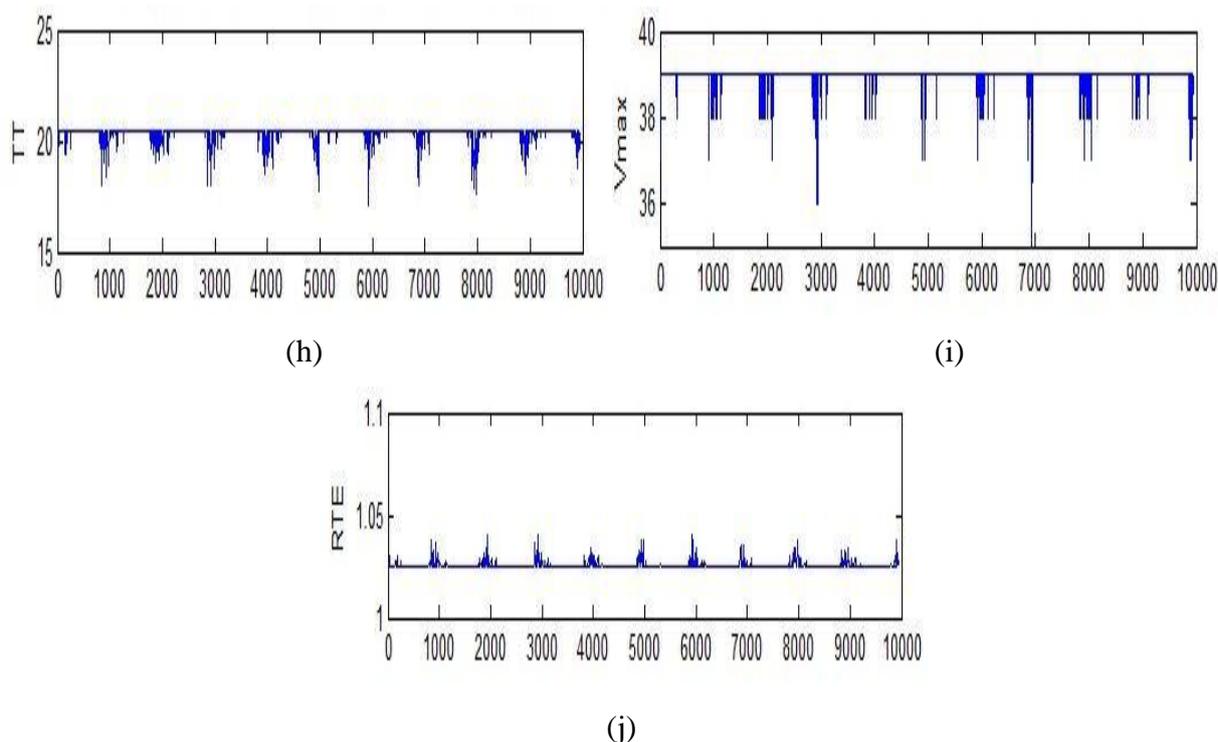


Figure IV.4. Analyse RQA pour une pollution de classe 1 à 20 kVeff

(a) indique le signal de la charge électrique, (b) indique RR, (c) indique DET, (d) indique L, (e) indique l_{max} , (f) indique ENTR, (g) indique LAM et (h) indique TT, (i) indique v_{max} (j) indique RTE.

La figure IV.4 représente les paramètres de l'analyse RQA du signal de la charge électrique pour une pollution de classe 1. Ces paramètres ont des structures totalement différentes de ceux des courants de fuites.

La figure IV.4.b représente l'évolution du paramètre RR, ses valeurs sont très peu variables. Cette variation comporte plusieurs pics qui atteignent une longueur maximum de 0.02. De telles valeurs décrivent une structure dépourvue des zones laminaires, ce qui indique un comportement périodique de la charge électrique.

Le DET de la figure IV.4.c est lui aussi très peu variant. Sa structure est presque identique à celle du RR, avec des pics ne dépassant pas 0.0347. Cette évolution caractérise une structure déterministe, avec une absence de comportement chaotique.

D'après la figure IV.4.d le paramètre L varie entre 16.6087 et 21.8286, avec une valeur moyenne égale à 20.4588. Donc la présence d'importantes lignes diagonales. La longueur maximum L_{max} est constante de valeur égale à 39.

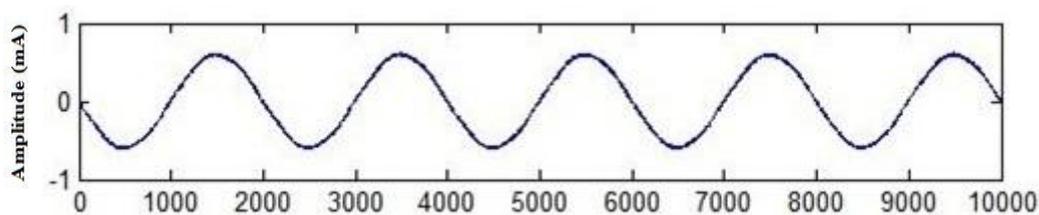
L'ENTR, représenté à la figure IV.4.f, n'est pas trop variable. Ces valeurs sont comprises entre 3.1217 et 3.6376. Ca valeur moyenne vaut 3.6197. Cela indique une forte complexité de la charge électrique.

La figure IV.4.g représente le LAM, qui est quasi constant. Seuls quelques micro-pics, de longueur inférieure à 0.01 y sont présents. Cela traduit un état stationnaire de la charge électrique. Le paramètre TT est très peu oscillant (figure IV.4.h). Ces oscillations sont de valeurs comprises entre 17.1685 et 20.5000, donc peu variables. La valeur moyenne est égale à 20.3882. Cela indique l'absence des bandes blanche.

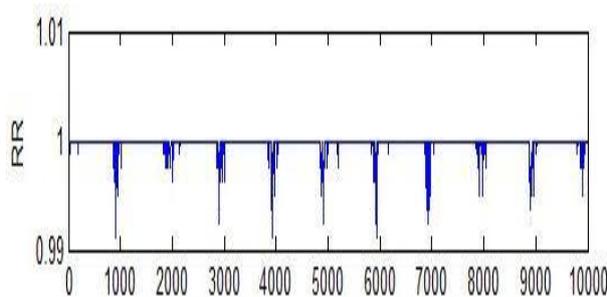
Le RTE, représenté dans la figure IV.4.j, varie très peu entre 1.025 et 1.0408. Ca valeur moyenne vaut 1.0255. Le signal de la charge électrique est donc bien périodique.

IV.2.2.2. Cas d'une pollution de classe 2

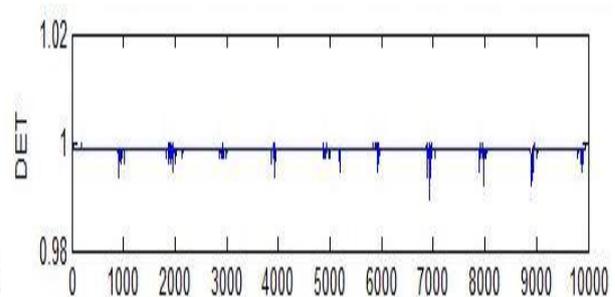
Dans ce cas, on s'intéressera à appliquer la RQA à un signal de la charge électrique de pollution de classe 2. La conductivité de la solution polluante est de 6mS/cm.



(a)



(b)



(c)

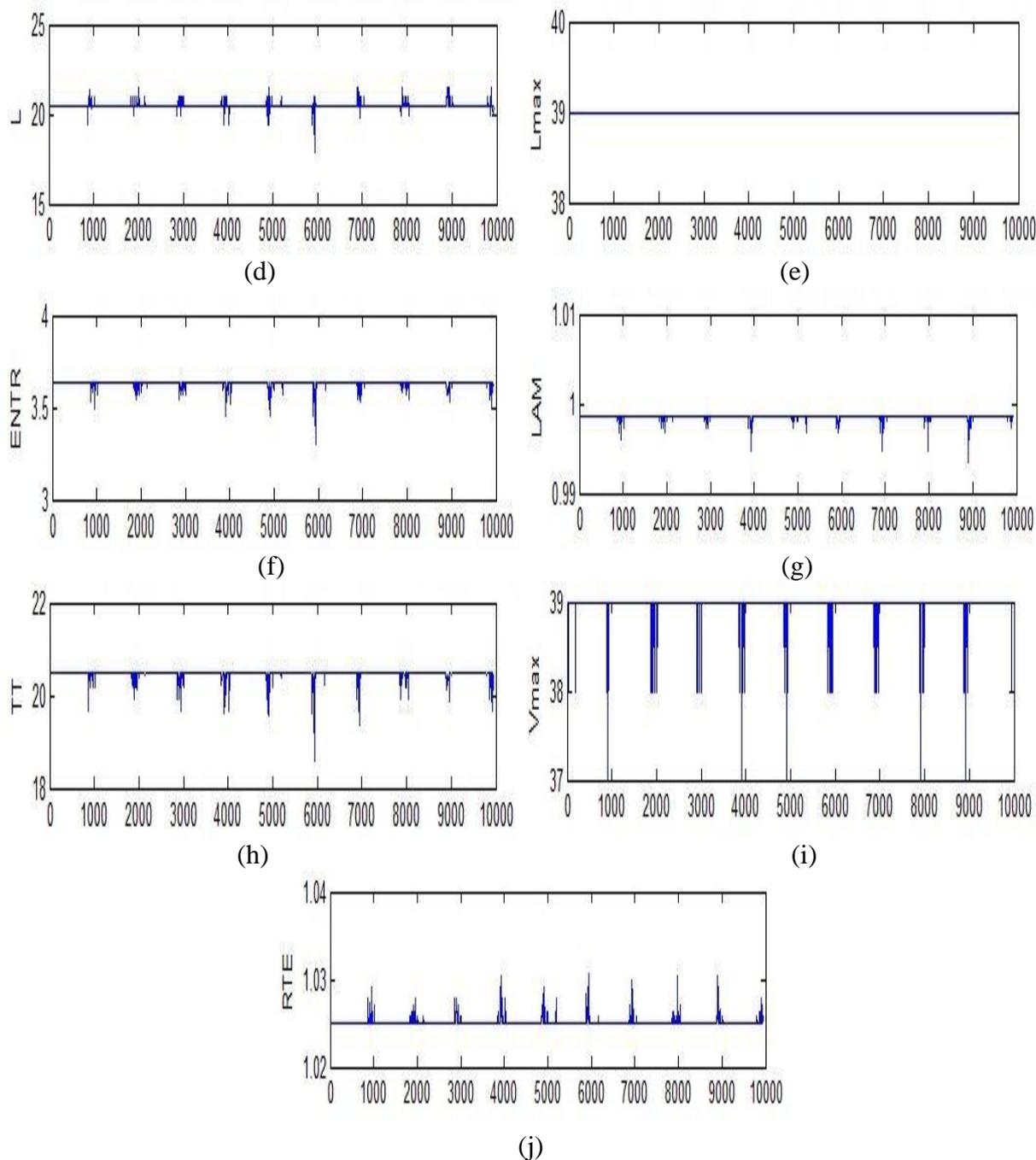


Figure IV.5. Analyse RQA pour une pollution de classe 2 à 20 kVeff

(a) indique le signal de la charge électrique, (b) indique RR, (c) indique DET, (d) indique L, (e) indique l_{max} , (f) indique ENTR, (g) indique LAM et (h) indique TT, (i) indique v_{max} (j) indique RTE.

La figure IV.5, représente les paramètres de l'analyse RQA du signal de la charge électrique pour un niveau de pollution de classe 2.

Le RR, présenté à la figure IV.5.b, est moins variable que celui de la classe 1. Toutes ces valeurs sont supérieures à 0.99. La charge électrique a toujours un comportement périodique.

Le DET, représenté dans la figure IV.5.c, est lui aussi très peu variable. Sa structure identique à celle du RR, avec des pics ne dépassant pas 0.01. On conclue que le signal de la charge électrique a une structure déterministe, avec une absence de comportement chaotique.

La figure IV.5.d représente le paramètre L. il varie entre 17.9302 et 21.5, avec une valeur moyenne égale à 20.5114. La présence de grandes lignes diagonales est donc un fait. La longueur maximum L_{max} est toujours égale à 39.

L'ENTR, représenté à la figure IV.5.f, est encore moins variable que précédemment. Ces valeurs sont entre 3.3013 et 3.6376 et sa valeur moyenne vaut 3.6338. La complexité de la charge électrique a augmenté.

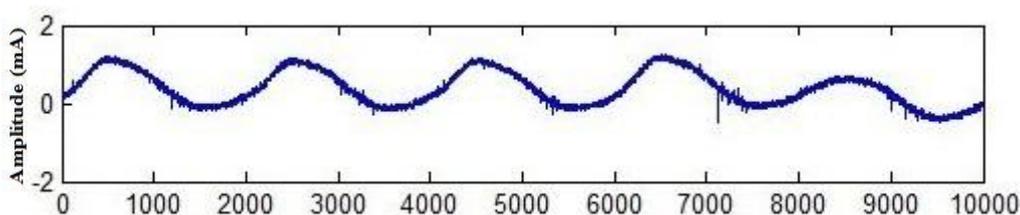
le LAM est plus stable (figure IV.5.g), seuls quelques pics presque imperceptibles sont présent. Donc la charge électrique est dans un état stationnaire.

Le paramètre TT présenté à la figure IV.5.h, est constant. La variation est en forme de faibles pics de valeurs comprises entre 18.5904 et 20.5000. Sa valeur moyenne vaut 20.4799, ce qui indique l'absence des bandes blanches.

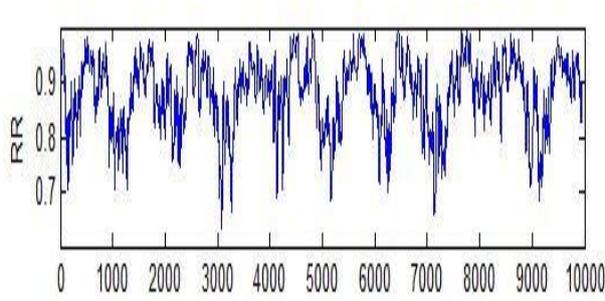
Le RTE, représenté dans la figure IV.5.j est presque constant. Il varie très peu entre 1.025 et 1.0305. Sa valeur moyenne est égale à 1.0251. Cela nous confirme que le signal de la charge électrique est toujours périodique pour ce degré de pollution.

IV.2.2.3. Cas d'une pollution de classe 3

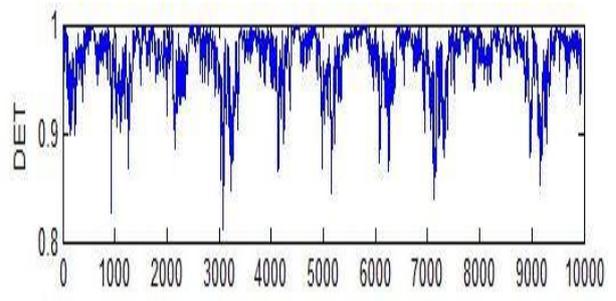
Dans ce cas, on s'intéressera à appliquer la RQA à un signal de la charge électrique de pollution de classe 3. La conductivité de la solution polluante est de 20mS/cm.



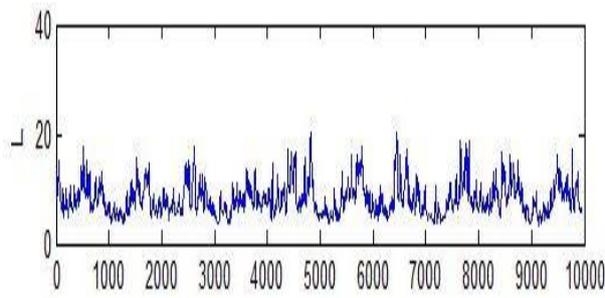
(a)



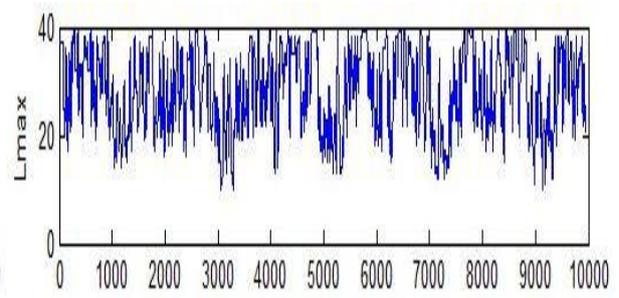
(b)



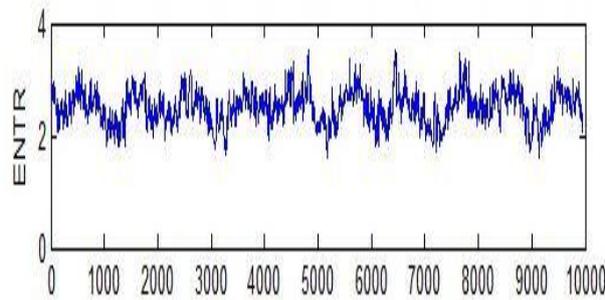
(c)



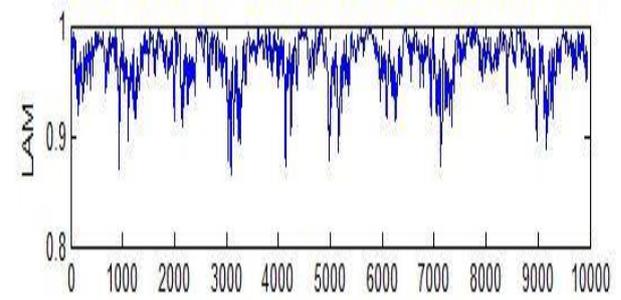
(d)



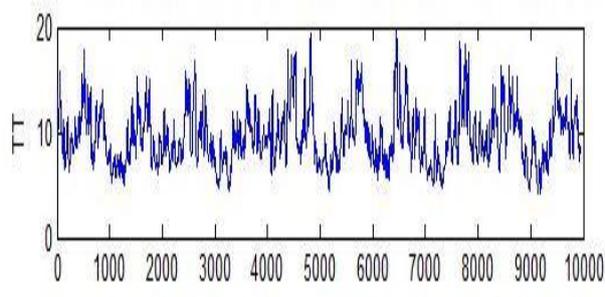
(e)



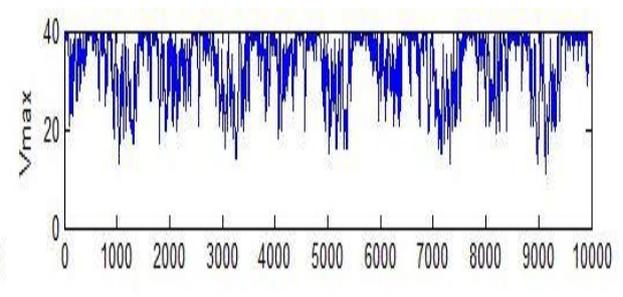
(f)



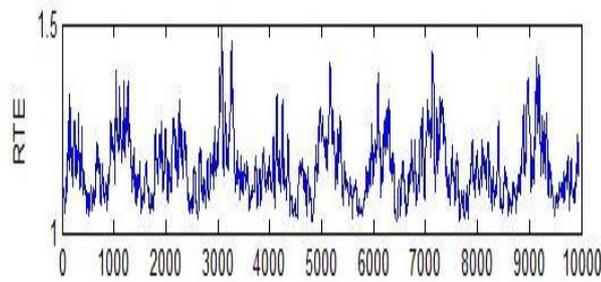
(g)



(h)



(i)



(j)

Figure IV.6. Analyse RQA pour une pollution de classe 1 à 20 kVeff

(a) indique le signal de la charge électrique, (b) indique RR, (c) indique DET, (d) indique L, (e) indique l_{max} , (f) indique ENTR, (g) indique LAM et (h) indique TT, (i) indique v_{max} (j) indique RTE.

La figure IV.6, représente les paramètres de l'analyse RQA du signal de la charge électrique pour un niveau de pollution de classe 3, ceux-ci très différents de ceux des autres classes.

La figure IV.6.b, présente le RR qui est très variable. Il oscille entre 0.6346 et 0.9949 et sa valeur moyenne est égale à 0.8790. Une telle structure indique un comportement chaotique de la charge électrique.

Le DET, représenté dans la figure IV.6.c varie fortement. Ayant des pics qui descendent jusqu'à 0.8121 dans les zones à comportement chaotique. On conclue que le signal de la charge électrique a une structure chaotique.

Le paramètre L varie grandement (figure IV.6.d). Il oscille fortement entre 3.4468 et 20.5895. Sa valeur moyenne décroît considérablement jusqu'à 8.1823, ce qui indique que les lignes diagonales sont courtes. Ce qui peut être interprété par l'approche d'un état instable, donc un contournement imminent. La longueur maximum L_{max} est très oscillante, de valeur maximum égale à 39.

La figure IV.6.f représentant l'ENTR a une structure très oscillante. Variant entre 1.6240 et 3.5281. Sa valeur moyenne est faible valant 2.5058. Ce qui indique une faible complexité de la charge électrique.

La figure IV.6.g présente le LAM, qui est caractérisé par d'importants pics. Les pics sont très larges et d'intensité qui fait baisser le LAM jusqu'à 0.8664. Sa valeur moyenne est égale à 0.9693. Cela décrit un changement dans la dynamique de la charge électrique indiquant un contournement proche.

Le paramètre TT représenté à la figure IV.6.h oscille fortement entre 4.1488 et 19.557. Sa valeur moyenne chute jusqu'à 9.5547. De telles valeurs décrivent un état intermittent imminent, ainsi qu'une présence de fortes décharges.

Le RTE varie intensément (figure IV.6.j) entre 1.0298 et 1.4905. Sa valeur moyenne a fortement augmenté jusqu'à 1.1536. De telles variations indiquent l'intense présence de points récurrents et donc de décharges.

IV.2.3. Discussion des résultats

Les résultats obtenus suite à l'application de l'analyse quantitative récurrente (RQA) sur le signal du courant de fuite montrent que cette approche est efficace afin de distinguer entre les trois classes de pollution étudiées. Cette distinction est plus évidente entre la première et les deux autres classes.

Nous avons jugé que les paramètres les plus adéquats pour estimer la sévérité de pollution sont les : RR, TT et RTE, qui ont un changement de valeurs très important entre la classe 1 et les deux autres classes.

Les résultats de l'analyse du signal de la charge électrique montrent une distinction entre la classe 3 et les deux autres classes. Toujours sur les critères de quelques paramètres, qui change de façon significative pour la classe 3, alors qu'il est presque identique pour les classes 1 et 2.

Donc afin d'avoir une classification satisfaisante à trois niveaux le mieux est de combiner les analyses des RQA du courant de fuite et de la charge électriques. Cette combinaison devra être soit de manière séquentielle une après l'autre, soit parallèle donc en même temps. Et afin que sa soit optimale l'analyse devra se faire sur les quelques paramètres cités dessus, pour éviter tout calcul superflus et donc une perte de temps.

Conclusion

L'analyse quantitative récurrente semble être un moyen de diagnostique efficace. Les résultats obtenus via cette approche sont difficiles à interpréter, car une corrélation au niveau de la variation de ces paramètres doit être prise en compte.

Le mieux est donc de l'utiliser comme moyen de diagnostique complémentaire au diagramme de récurrence afin d'avoir le plus de certitude possible sur l'évolution de l'état du modèle de l'isolateur plane.

Conclusion

Générale

Le travail présenté nous a permis l'application de nouvelles techniques comparatives dérivées de la recurrent plot (RP) pour l'analyse des signaux électriques afin de parvenir à une méthode fiable pour la détection des décharges électriques.

Nous avons commencé par approfondir nos connaissances concernant cette méthode qui est considérée comme nouvelle dans le milieu du traitement du signal et qui a montré son efficacité dans plusieurs domaines.

Ce fut cette efficacité qui nous inspira dans notre travail, à appliquer la CRP et la JRP qui sont toutes deux des techniques comparatives dérivées de la RP. Cela sur différents signaux électriques, pour les différentes classes de pollutions. Afin d'arriver à une méthode de surveillance des surfaces planes des isolateurs.

L'analyse RP a servie de base à notre étude. On l'a appliqué sur le signal du courant de fuites tout en étudiant l'influence de la tension appliquée et celle de la conductivité de la solution polluante sur ce dernier.

Ce qui nous a donné des résultats plus que concluant nous permettant d'avancé dans notre travail et de l'élargir. Cela fut par l'intermédiaire de la CRP et de la JRP.

On a comparé ces deux méthodes on les appliquant sur le signal du courant de fuite et de celui de la charge électrique, une fois pour les trois classes de pollution en variant la tension appliquée et l'autre en variant la conductivité de la solution polluante.

Le choix entre ces deux méthodes fut déterminé en se basant sur le nombre d'informations utilisables récupérées, et il c'est porté sur la JRP.

Par la suite, on a étudié les possibilités de l'utilisation de cette méthode sur les différents signaux électriques présents dans la base de données du laboratoire de haute tension de l'école nationale polytechnique.

On a appliqué la JRP sur les combinaisons possibles des trois signaux du courant de fuite, de la tension appliquée et de la charge électrique. Cela pour déterminé la meilleure combinaison, toujours en se basant sur le critère du nombre d'informations utilisables.

La JRP du courant de fuite et de la charge électrique est celle qui donne les meilleurs résultats.

Pour clore notre travail et car la RP et toutes ces dérivées sont des analyses qualitatives liés à une représentation visuelle, l'étude d'une méthode quantitative fut de rigueur afin d'étudier la possibilité que cette dernière soit complémentaire ou remplaçante à nos résultats qualitatifs.

Pour cela on a appliqué la RQA sur le signal du courant de fuite et celui de la charge électrique, étant donné qu'ils ont fournis les meilleurs résultats précédemment.

Les résultats sont que la RQA pouvait fournir le diagnostic de la sévérité de pollution sur la surface du modèle plan. Quoique cette méthode doit être appliquée sur les deux signaux, celui du courant de fuite et celui de la charge électrique, afin de pouvoir avoir une distinction du degré de pollution suivant la norme CEI 60-1.

Références Bibliographiques

- [1] R.Porzal and M.Muhr, "Technical diagnostics, non-destructive state-estimation instead of damaging voltage test", in Proc. 10th Int. Conf. on HV Eng., pp. 405-408, Montreal, Canada, (1997).
- [2] M. Shah, G. G. Karady, and R. L. Brown, "Flashover mechanism of silicone rubber insulators used for outdoor insulation - II", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 10 (4), pp. 1972-1978, (1995).
- [3] S. Venkataraman and R. S. Gorur, "Prediction of Polymer Insulating Materials Degradation Using Daubechies Wavelet Transform", IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phen. (CEIDP), pp. 323-326, (2002).
- [4] B.X.Du, Y.Liu and H.J.Liu, "Recurrent plot analysis of leakage current for monitoring outdoor insulator performance", IEEE Trans. on Dielec And Elect . Insul., Vol. 16, No. 1, pp. 139-146, February 2009.
- [5] B. X. Du, D. S. Dong, "Recurrence Plot Analysis of Discharge Currents in Tracking Tests of Gamma-ray Irradiated Polymers ", IEEE Trans. on Dielec. And Electr. Insul., Vol. 15, No. 4, pp.974-981, August 2008.
- [6] B. X. Du, "Discharge energy and dc tracking resistance of organic insulating materials", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 8, pp. 897-901, (2001).
- [7] N. Yoshimura, S. Kumagai and B. X. Du, "Research in Japan on the tracking phenomenon of electrical insulating materials", IEEE Elect. Insul. Mag., Vol. 13, No. 5, pp. 8-19, (1997).
- [8] H. M. Banford, R. A. Fouracre, A. Faucitano, A. Buttafava and F. Artinotti, "The influence of chemical structure on the dielectric behavior of polypropylene", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 3, pp. 594-598, (1996).
- [9] V. K. Agarwal, H. M. Banford, B. S. Bernstein, E. L. Brancato, R. A. Fouracre, G. C. Montanari, J. L. Parpal, J. N. Seguin, D. M. Ryder and J. Tanaka, "The mysteries of multifactor ageing" _IEEE Elect. Insul. Mag., Vol. 11, No. 3, pp. 37-43, (1995).
- [10] I. Kuriyama, N. Hayakawa and Y. Nakase, "Radiation resistance of cable insulating materials for nuclear power generating stations", IEEE Trans. Electr. Insul. Vol. 13, pp. 164-171, (1978).
- [11] A. Wolf, J. B. Swift and H.L. Swinney, "Determining Lyapunov exponents from a time series", Physica D, Vol. 16, pp. 285-317, (1985).

- [12] J. P. Eckmann, S. O. Kamphorst and D. Ruelle, "Recurrence plots of dynamical systems", *Europhys Lett.*, Vol. 4, pp. 973–977, (1987).
- [13] IEC Publ.60112, "Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials", 4th edition, (2003).
- [14] A.H.El-Hag, S.H.Jayaram and E.A.Cherney, "Fundamental and low frequency harmonic components of leakage current as a diagnostic tool to study aging of RTV and HTV silicon rubber in salt-fog", *IEEE Trans. on Dielec. And Elect. Insul.*, Vol. 10, No. 1, pp. 128-136, February 2003.
- [15] T.Suda, "Frequency characteristics of leakage current waveforms of a string of suspension insulator", *IEEE Trans on Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, pp. 481-487, January 2005.
- [16] Zuo-Bing Wu, "Recurrence plot analysis of DNA sequences", *Physics Letters A* 332, pp. 250-255, October 2004.
- [17] ELECTROPHORESIS Volume 21, Issue 12, pp. 2321–2326, 1 July 2000.
- [18] Z.-B.Wu, "Self-similarity limits of genomic signatures", *Fractals* 11, (2003).
- [19] H. J. Jeffrey, "Chaos game representation of gene structure", *Nucleic Acids Res.* 18, (1990).
- [20] P. J. Deschavanne, A. Giron, J. Vilain, G. Fagot, and B. Fertil, "Genomic signature: characterization and classification of species assessed by chaos game representation of sequences", *Mol. Biol. E. vol.* 16, (1999).
- [21] H.Ochman , J.G. Lawrence , E.A. Groisman , "Lateral gene transfer and the nature of bacterial innovation", *Nature*,405(6784), pp.299-304, Mai 2000.
- [22] J. L. Bennetzen, "Transposable element contributions to plant gene and genome evolution", *Plant Mol. Biol.* 42 (2000) 251.
- [23] Y. Liu, B. X. Du, "Recurrent Plot Analysis of Leakage Current on Flashover Performance of Rime-iced Composite Insulator ", *IEEE Trans. on Dielec. And Electr. Insul.*, Vol. 17, No. 2, pp.465-472, April 2010.
- [24] J.P. Zbilut, N. Thomasson, C.L. Webber, "Recurrence quantification analysis as a tool for nonlinear exploration of non stationary cardiac signals", *Medical Engineering & Physics* 24, pp.53–60, (2002).

- [25] Webber Jr. CL, Zbilut J.P. "Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies", J. Appl. Physiol., pp.965–973, (1994).
- [26] Ravish, Umashankar KS, Abhinav Alva, Gangadharan KV et Vijay Desai, "Recurrence Quantification Analysis To Compare The Machinability Of Steels", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences., VOL. 6, NO. 1, pp.8-13, January 2011.
- [27] Geoffrey Boothroyd, Winston A. Knight. " Fundamentals of Machining and Machine Tools", Marcel Dekker Inc. (1989).
- [28] Norbert Marwan. "Encounters With Neighbours: Current developments of concepts based on recurrence plots and their applications", Ph.D. Thesis. University of Potsdam, Institute for Physics, Mai 2003.
- [29] N.Marwan, M.C.Romano, M Thiel, J. Kurths, "Recurrence plots for the analysis of complex systems", Science direct, Physics Reports 438, pp. 256– 259, January 2007.
- [46] E. Ghys, "L'attracteur de Lorenz, paradigme du chaos", CNRS - ENS Lyon, Séminaire Poincaré XIV, pp.1-52, 2010.
- [31] LORENZ, 1979 in G. ABRAHAM-FROIS pp. 152, (1994).
- [32] H.POINCARÉ, "*Science et Methode*", 1909 in G.ABRAHAM-FROIS (1994).
- [33] M. Viana, "What's new on Lorenz strange attractors?", Math. Intelligencer 22 (3), pp.6-19, (2000).
- [34] F. Takens, "Detecting strange attractors in turbulence", In Lecture notes in mathematics Dynamical systems and turbulence, Vol. 898, Berlin, pp. 366, 1981.
- [35] N. Packard, J. Crutchfield, J. Farmer, and R. Shaw, "Geometry from a time series". Phys. Rev. Lett., pp. 45-712, (1980).
- [36] H. S. Kim, R. Eykholt, and J.D. Salas, "Nonlinear dynamics, delay times, and embedding windows". Physica D Vol.127, pp. 48–60, (1999).
- [37] H. Poincaré, "Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique", Acta Mathematica, 13, pp. 1–271, (1890).
- [38] J.-P. Eckmann, S.O. Kamphorst, D. Ruelle, "Recurrence plots of dynamical systems, Europhys", Lett. 5, 973–977, (1987).

- [39] J.M. Nichols, S.T. Trickey and M. Seaver, "Damage detection using multivariate recurrence quantification analysis", *Mech. Syst. Signal Process.* 20 (2), pp. 421–437, (2006).
- [40] N. Marwan, N. Wessel, U. Meyerfeldt, A. Schirdewan and J. Kurths, "Recurrence plot based measures of complexity and its application to heart rate variability data", *Phys. Rev.* 66 (2), pp. 56-63, (2002).
- [41] G.M. Mindlin, R. Gilmore, "Topological analysis and synthesis of chaotic time series", *Physica D* 58 (1–4), pp.229–242, (1992).
- [42] M. Koebebe, G. Mayer-Kress, "Use of recurrence plots in the analysis of time-series data", in: M. Casdagli, S. Eubank (Eds.), *Proceedings of SFI Studies in the Science of Complexity*, vol. 21, Redwood City, Addison-Wesley, Reading, MA, pp. 361–378, (1992).
- [43] J.P. Zbilut, J.M. Zaldívar-Comenges, F. Strozzi, "Recurrence quantification based Liapunov exponents for monitoring divergence in experimental data", *Phys. Lett. A* 297 (3–4), pp.173-181, (2002).
- [44] M. Thiel, M.C. Romano, J. Kurths, R. Meucci, E. Allaria, F.T. Arecchi, "Influence of observational noise on the recurrence quantification analysis", *Physica D* 171 (3), pp.138–152, (2002).
- [45] M. Thiel, M.C. Romano, J. Kurths, "Spurious structures in recurrence plots induced by embedding", *Nonlinear Dynam.* 44 (1–4), pp.299–305, (2006).
- [46] N.Marwan, M.C.Romano, M Thiel, J. Kurths, "Recurrence plots for the analysis of complex systems", *Science direct, Physics Reports* 438, pp. 274– 283, January 2007.
- [47] T.K. March, S.C. Chapman, R.O. Dendy, "Recurrence plot statistics and the effect of embedding", *Physica D* 200 (1–2), pp.171–184, (2005).
- [48] J.P. Zbilut, A. Giuliani, C.L. Webber Jr., "Detecting deterministic signals in exceptionally noisy environments using cross-recurrence quantification", *Phys. Lett. A* 246 (1–2), pp.122–128, (1998).
- [49] N. Marwan, J. Kurths, "Nonlinear analysis of bivariate data with cross recurrence plots", *Phys. Lett. A* 302 (5–6), pp.299–307, (2002).
- [50] A. Groth, "Visualization of coupling in time series by order recurrence plots", *Phys. Rev. E* 72 (4), (2005).

- [51] N. Marwan, "Untersuchung der Klimavariabilität in NWArgentinien mit Hilfe der quantitativen Analyse von Recurrence Plots", Master's Thesis, Dresden University of Technology, October 1999.
- [52] A. Groth, "Visualization and detection of coupling in time series by order recurrence plots", Preprint series of the DFG priority program 1114, vol. 67, December 2004.
- [53] N. Marwan, J. Kurths, "Line structures in recurrence plots", *Phys. Lett. A* 336 (4–5), pp. 349–357, (2005).
- [54] G. Rosenblum, A.S. Pikovsky, J. Kurths, "From phase to lag synchronization in coupled chaotic oscillators", *Phys. Rev. Lett.* 78 (22), pp. 4193–4196, (1997).
- [55] O.V. Sosnovtseva, A.G. Balanov, T.E.Vadivasova, V.V. Astakhov, E. Mosekilde, "Loss of lag synchronization in coupled chaotic systems", *Phys. Rev. E* 60 (6), (1999).
- [56] J.P. Zbilut, C.L. Webber Jr., "Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots", *Phys. Lett.* 171 (3–4), pp. 199–203, (1992).
- [57] L. Trulla, A. Giuliani, J.P. Zbilut and C.L. Webber Jr., "Recurrence quantification analysis of the logistic equation with transients". *Physics Letters*, 223 (4), pp. 225–260, (1996).
- [58] T. Suda, "Frequency Characteristics of leakage current waveforms of a string of suspension insulator", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 20, No. 2, pp. 481–487, (2005).
- [59] B. X. Du, Yong Liu, H. J. Liu, "Recurrent plot analysis of leakage current for monitoring outdoor insulator performance", *IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul.*, Vol. 16, No. 1; February 2009.
- [60] Webber, Jr, C.L, and Zbilut, J.P, "Dynamical assessment of Physiological systems and states using recurrence plot strategies", *Journal of Applied Physiology*, 76, pp. 965–973, (1994).

Annexe A

Base des signaux utilisés

Pour la vérification des méthodes développées dans ce travail, une base des signaux a été utilisée. Celle-ci contient des signaux issus des essais effectués au niveau du laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique sur un modèle plan d'isolateur.

Mod1

- Cette base était élaborée par B. Moula et A. Mekhaldi, au cours de ses travaux présentés à la CNHT en 2011, sous le titre « *Comparaison des performances d'un isolateur haute tension soumis aux conditions de pollution artificielle* ».
- Le modèle utilisé est un modèle plan simulant l'isolateur réel **PVS 120B**.
- La pollution est non-uniforme.
- Cette base est constituée de deux ensembles. On appellera le premier ensemble **G1Mod1** représentant les signaux du courant de fuite et **G2Mod1** pour les signaux de la charge électrique. Chaque signal des deux ensembles est sur 10000 points correspondant à différentes bandes fréquentielles pour une fréquence d'échantillonnage de 100 kHz.
- Pour la mesure du courant de fuite, une résistance de $R=1k\Omega$ a été utilisée, et pour le signal de charge électrique une capacité de $33\ \mu F$.

Le montage utilisé pour récupérer les différents signaux de la base de données est donné par la figure A.1.

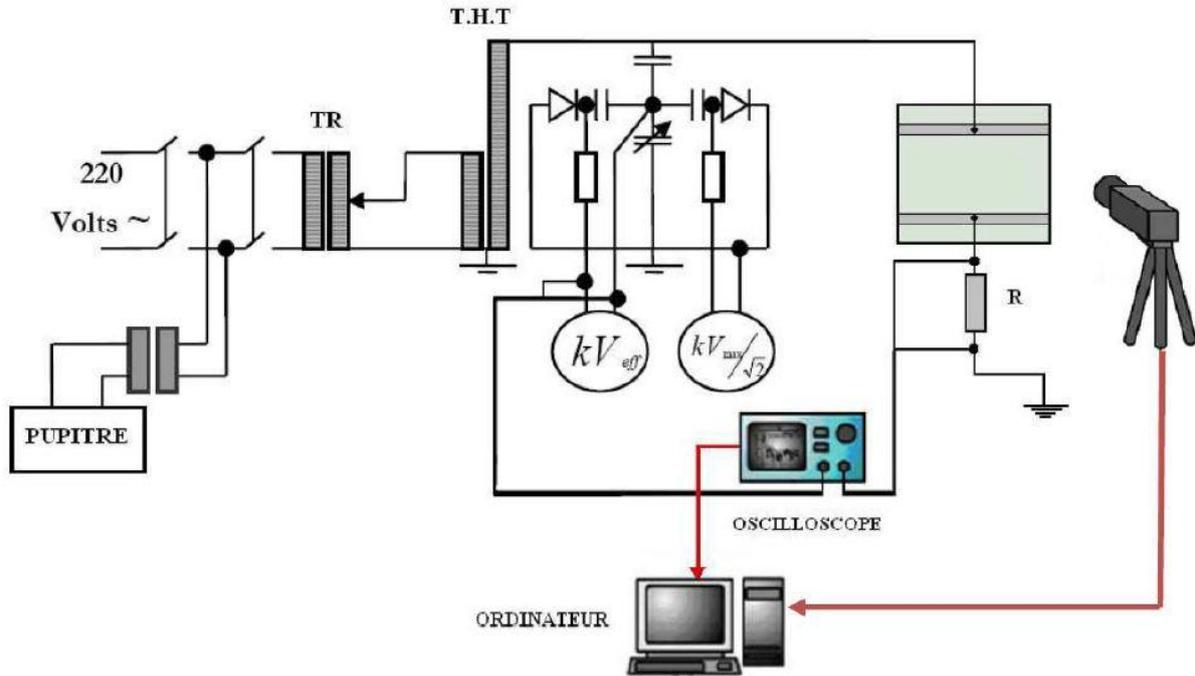


Figure A.1. Dispositif expérimental.

Notant que ce montage est pour la mesure des signaux de la tension appliquée et du celui du courant de fuite. Pour la mesure de la charge électrique, il suffit de remplacer la résistance R du montage par une capacité C.

Annexe B

Les classes de pollution

Afin d'étudier de la sévérité de la pollution, on adopte la norme CEI 60-1 qui exprime la pollution en fonction de la salinité équivalente.

- **Classe 1.** Pollution faible d'origine naturelle (sauf marine). Elle concerne généralement des zones non industrielles ayant une faible densité d'habitation, situées loin de la mer. Un isolement normal convient facilement pour ces zones. La salinité équivalente maximale retenue pour cette classe correspond à une pulvérisation d'une solution de chlorure de sodium de concentration 2.5g/l.
- **Classe 2.** Pollution moyenne d'origine naturelle (sauf marine) ou faiblement industrielle. Elle correspond à des zones à moyenne densité d'habitation et situées loin de la mer. Ces zones nécessitent un isolement renforcé, la concentration de la salinité équivalente maximale retenue est de 10g/l.
- **Classe 3.** Pollution forte d'origine marine et industrielle. Les zones considérées possèdent une forte densité d'habitation et sont situées près de la mer. Elles sont exposées à des embruns marins relativement forts. Ces sites nécessitent un isolement important, la concentration de la salinité équivalente maximale est de 80g/l.

Concentration en Kaolin [g/l]	Conductivité volumique [mS/cm]	Concentration de sel utilisé [g/l]	Classe
40	1,2 et 3,5	Entre 0.7 et 2.5	1
	6	Entre 3 et 10	2
	10 et 20	Inférieure à 60	3
100	1,2 et 3,5	Entre 0.7 et 2.5	1
	6	Entre 3 et 10	2
	10 et 20	Inférieure à 60	3
200	1,2 et 3,5	Entre 0.7 et 2.5	1
	6	Entre 3 et 10	2
	10 et 20	Inférieure à 60	3

Tableau B.1. La norme CEI 85-1 en fonction de la conductivité volumique de la couche polluante et de la concentration de sel utilisé.